

Einsatz und Potentiale von Stromspeichern:
Energiewirtschaftliche Bewertung aus Sicht eines
Energieversorgers

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: Kleinholz



Vorname: Nora Géraldine



Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Ort, den*: Hannover, 29.10.2015

*(Datum der Beendigung der Arbeit)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	X
Variablenverzeichnis	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Relevanz des Themas.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise.....	4
2 Stromspeichersysteme.....	5
2.1 Klassifizierung von Stromspeichersystemen.....	5
2.2 Mechanische Stromspeichersysteme	6
2.2.1 Pumpspeicher	6
2.2.2 Druckluftspeicher.....	8
2.2.3 Schwungradspeicher.....	9
2.3 Elektrische Stromspeichersysteme	11
2.3.1 Doppelschichtkondensatoren	11
2.3.2 Supraleitender magnetischer Energiespeicher.....	12
2.4 Chemische Stromspeichersysteme.....	13
2.4.1 Systeme mit internem Speicher.....	13
2.4.1.1 Blei-Säure-Batterien	13
2.4.1.2 Lithium-Ionen-Batterien	15
2.4.1.3 Natrium-Schwefel-Batterien.....	17
2.4.2 Systeme mit externem Speicher.....	19
2.4.2.1 Redox-Flow-Batterien.....	19
2.4.2.2 Power-to-Gas-Systeme	20
2.5 Gegenüberstellung der Stromspeichersysteme	23

3	Anwendungen von Stromspeichersystemen in energiewirtschaftlichen Märkten	24
3.1	Handel am Terminmarkt	24
3.2	Handel am Spotmarkt	27
3.2.1	Handel am Day-Ahead-Markt	27
3.2.2	Handel am Intraday-Markt	29
3.3	Systemdienstleistungen	29
3.3.1	Bereitstellung von Regelleistung	30
3.3.2	Bereitstellung von Blindleistung	35
3.3.3	Bereitstellung von Schwarzstartreserve	36
3.4	Anwendungen für Privatkunden	37
3.4.1	Hausbatteriespeicher ergänzend zu Photovoltaikanlagen	37
3.4.2	Batteriespeicher in der Elektromobilität	42
3.5	Vermeidung von Verteilnetzausbau	44
3.6	Identifikation geeigneter Stromspeichersysteme	45
4	Simulationsmodell zu Betriebsstrategien von Hausbatteriespeichern und deren Wirtschaftlichkeit	47
4.1	Annahmen	48
4.2	Datengrundlage	50
4.3	Modellbildung	51
4.3.1	Alternativen der Stromversorgung	51
4.3.2	Betriebsstrategien von Batteriespeichern	52
4.3.2.1	Feste Einspeisebegrenzung durch Abregelung	52
4.3.2.2	Prognosebasierte dynamische Einspeisebegrenzung	53
4.3.2.3	Vergleich der Betriebsstrategien	55
4.3.3	Betriebsverhalten der Anlagen	56
4.3.4	Wirtschaftliche Ergebnisgrößen	57
4.3.5	Technische Ergebnisgrößen	61
4.3.6	Sensitivitätsanalyse und Szenarienbildung	61
4.4	Fallbeispiele	62
4.5	Modellübertragung auf einen Gewerbebetrieb	63

4.6	Programmierool	65
4.7	Auswertung	68
4.7.1	Auswertung der Zeitreihen	68
4.7.1.1	Betriebsverhalten der Anlagen bei verschiedenen Betriebsstrategien des Batteriespeichers	68
4.7.1.2	Betriebsstrategie mit dynamischer Einspeisebegrenzung bei idealen und realen Prognosen	72
4.7.2	Auswertung der Ergebnisse	74
4.7.2.1	Auswertung der wirtschaftlichen Ergebnisgrößen	75
4.7.2.2	Auswertung der technischen Ergebnisgrößen	79
4.7.2.3	Auswertung der Sensitivitätsanalyse	82
4.7.2.4	Vergleich verschiedener Szenarien	84
4.7.3	Erkenntnisse aus der Modellübertragung auf einen Gewerbebetrieb	86
4.7.4	Bewertung und Einordnung der Resultate	89
4.8	Modellerweiterungen	90
5	Handlungsempfehlungen	91
6	Fazit und Ausblick	92
	Literaturverzeichnis	97
	Anhang	110
I.	Ordnerstruktur der beiliegenden Daten-CD	110
II.	Benutzeranleitung für das Simulationsmodell	111
III.	Auszug aus dem Quellcode des Programms	113
IV.	Expertengespräch Fraunhofer UMSICHT	115
V.	Expertengespräch P3 Ingenieurgesellschaft mbH	117
VI.	Expertengespräch Fachgebiet für Elektrische Energiespeichersysteme, Leibniz Universität Hannover	118
VII.	Betriebsverhalten der Anlagen an einem wechselnd bewölkten Tag	120
	Ehrenwörtliche Erklärung	121

1 Einleitung

1.1 Motivation und Relevanz des Themas

Das deutsche System der Stromerzeugung wird im Zuge der Energiewende derzeit auf eine Stromversorgung ausgerichtet, die auf erneuerbaren Energien basiert. So kann eine nachhaltige Entwicklung der Stromversorgung ermöglicht werden, die fossile Energieträger schrittweise ablöst. Stromspeicher eignen sich dabei für eine flexible Reaktion auf Abweichungen von prognostizierter und tatsächlicher Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien und für den zeitlichen Ausgleich von Stromerzeugung und -verbrauch. Diese Thematik ist in energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen eingebettet, die zunächst erläutert werden. Somit wird im Folgenden ein Ausblick auf das zukünftig in Deutschland zu erwartende Stromerzeugungssystem gegeben.

Die Rahmenbedingungen für das zukünftige Stromerzeugungssystem sind durch verschiedene Zielsetzungen der Bundesregierung festgelegt. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in der seit August 2014 geltenden Fassung sieht einen Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms am Bruttostromverbrauch für das Jahr 2025 von 40 bis 45 % und für das Jahr 2035 von 55 bis 60 % vor. Im Jahr 2050 soll der Anteil mindestens 80 % betragen. Im Jahr 2013 betrug der Anteil 25,4 %, im Jahr 2014 27,8 %.¹ Steigt der Anteil erneuerbarer Energien in dem Maß weiter an, können die Ziele des EEG erreicht werden. Aus einer Energiereferenzprognose, welche vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) in Auftrag gegeben wurde, um die zu erwartende Entwicklung der Energiemärkte zu untersuchen, geht jedoch hervor, dass die Anteile 2025 47 %, 2040 55 % und 2050 64 % betragen werden.² Demnach würde lediglich das Ziel für das Jahr 2025 erreicht werden.

Weitere energiepolitische Klimaschutzziele im Bereich der Stromerzeugung betreffen die Reduktion von Treibhausgasemissionen wie etwa von Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄). Gegenüber der Bruttostromerzeugung im Jahr 1990 sollen bis 2020 Absenkungen um 40 % und bis 2050 um mindestens 80 % erfolgen, welche jedoch mit zu erwartenden Werten von 36 % bzw. 65 % nicht erreicht werden. Gründe sind ein nicht ausreichender Rückgang des Primärenergieverbrauchs sowie zu wenige CO₂-freie Energieträger.³

Im Jahr 2011 wurde der zeitlich bis 2022 gestaffelte Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung beschlossen. Dies beeinflusst unmittelbar den zukünftigen Kraftwerkspark Deutschlands, insgesamt aber auch die beschriebenen

¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2015b.

² Vgl. Prognos AG et al. 2014, S. 213.

³ Vgl. ebd., S. 19.

energiepolitischen Rahmenbedingungen. Die gesamte installierte Leistung steigt kontinuierlich bis auf 255 GW im Jahr 2050 an.⁴ Dies ist vor allem auf den starken Ausbau volatiler Wind- und Solarenergie und deren vergleichsweise geringen Beitrag an gesicherter Leistung zurückzuführen. Beispielsweise können sogenannte „dunkle Flauten“ auftreten, welche Wetterkonstellationen mit lang anhaltenden Hochdruck-Wetterlagen im Winter bezeichnen. Dabei tritt geringe Windenergieeinspeisung gleichzeitig mit hohem Strombedarf in den Wintermonaten bei geringer Solarenergieeinspeisung auf. Meist dauern derartige Wetterlagen nicht länger als drei Wochen an.⁵ Zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit werden demnach weiterhin konventionelle Kraftwerke benötigt. Aus diesem Grund bleibt ihre installierte Leistung zwischen 2020 und 2050 mit etwa 75 GW zur sicheren Deckung der deutschen Jahreshöchstlast nahezu konstant. Konventionelle Kraftwerke werden langfristig vor allem flexible Gaskraftwerke mit vergleichsweise niedrigen Fixkosten sein.⁶

Im Zuge der Energiewende muss das Stromerzeugungssystem immer häufiger flexibel auf Abweichungen von Prognosen und tatsächlicher Einspeisung erneuerbarer Energien reagieren können, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Hierfür stellen Stromspeicher eine geeignete Möglichkeit dar, die dabei in Konkurrenz zu anderen Flexibilitätsoptionen stehen. Man unterscheidet systemseitige, erzeugungs- und nachfrageseitige Flexibilitätsoptionen. Konkret sind damit Netzausbau, flexible Kraftwerksfahrweisen und Lastmanagement z. B. in der Industrie gemeint. Während durch Netzausbau ein räumlicher Ausgleich von Stromerzeugung und -verbrauch geschaffen wird und durch erzeugungs- sowie nachfrageseitige Flexibilitätsoptionen ein momentaner Ausgleich, können nur Stromspeicher für einen zeitlichen Ausgleich sorgen. Die konkreten Anforderungen an im zukünftigen Stromerzeugungssystem integrierte Stromspeichersysteme sind je nach Anwendungsgebiet unterschiedlich. Generell wichtig sind jedoch eine hohe Energiedichte, ein hoher Wirkungsgrad sowie eine zweckdienliche Größe der Speicherkapazität.

1.2 Zielsetzung

Wie aus dem vorherigen Abschnitt hervorgeht, stellen Stromspeicher eine geeignete Möglichkeit für den zeitlichen Ausgleich von Stromerzeugung und -verbrauch dar, damit das Stromerzeugungssystem im Zuge der Energiewende flexibel auf Abweichungen von Prognosen und tatsächlicher Einspeisung erneuerbarer Energien reagieren kann. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher verschiedene Stromspeichersysteme und ihre Anwendungen in energiewirtschaftlichen Märkten recherchiert und analysiert. Das Ziel ist, aus der Gegenüberstellung von Stromspeichersystemen und

⁴ Vgl. Prognos AG et al. 2014, S. 222ff.

⁵ Vgl. Fuchs et al. 2012, S. 24.

⁶ Vgl. Prognos AG et al. 2014, S. 222ff.

ihren Anwendungsgebieten eine Kombination zu identifizieren, die wirtschaftliches Potential für die Zukunft aufweist. Für diese Kombination werden anschließend mithilfe eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulationsmodells detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnungen und technische Analysen durchgeführt. Die zunächst zu beantwortenden Forschungsfragen dieser Arbeit sind:

- Welche Stromspeichersysteme sind hinsichtlich ihrer technischen Parameter für welche Anwendungen in energiewirtschaftlichen Märkten geeignet?
- Ist ein wirtschaftlicher Einsatz der für den jeweiligen Markt als technisch geeignet identifizierten Stromspeichersysteme möglich?

Als Forschungsfeld mit wirtschaftlichem Potential wird der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien als Solarstromspeicher im Privatkundenbereich identifiziert. Eine Untersuchung auf diesem Themenfeld ist sinnvoll, da der Einsatz von Hausbatteriespeichern ergänzend zu Photovoltaikanlagen mit dem Ziel der Eigenverbrauchserhöhung in bisherigen Studien oft technisch, aber nur selten wirtschaftlich bewertet wurde.⁷ Mit der Entwicklung eines Simulationsmodells wird das Ziel verfolgt, folgende Forschungsfragen zu Hausbatteriespeichern und ihrer Wirtschaftlichkeit zu beantworten:

- Wie wirken sich unterschiedliche Betriebsstrategien auf das Betriebsverhalten von Batteriespeicher und Photovoltaikanlage aus?
- Welchen Einfluss haben Prognosefehler realer Prognosen in prognosebasierten Betriebsstrategien?
- Welche Speicherdimensionierung hinsichtlich nutzbarer Speicherkapazität und Lade- bzw. Entladeleistung ist bei welcher Betriebsstrategie für welchen Haushalt (im Wohnblock, Mehr- oder Einfamilienhaus) wirtschaftlich vorteilhaft?
- Wie verändert sich das Strombezugsverhalten von Haushaltskunden durch den Einsatz eines Batteriespeichers zur Erhöhung des Stromeigenverbrauchs, aus Sicht des Stromversorgers sowie aus Sicht des Netzbetreibers?
- In welcher zeitlichen Perspektive und unter welchen Bedingungen können Hausbatteriespeicher eine wirtschaftlich vorteilhafte Ergänzung zu Photovoltaikanlagen von Haushaltskunden darstellen?
- Inwiefern können mithilfe des Simulationsmodells Erkenntnisse über Batteriespeicher im Gewerbekundenbereich gewonnen werden?

⁷ Vgl. Fraunhofer UMSICHT und Fraunhofer IWES 2014, S. 163.

1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise

Im Anschluss an diesen einleitenden Teil der Arbeit folgt in Kapitel 2 eine Übersicht zu mechanischen, elektrischen und chemischen Stromspeichersystemen. Daran schließen sich in Kapitel 3 ihre Anwendungen in verschiedenen energiewirtschaftlichen Märkten an. In Kapitel 4 erfolgt die Entwicklung des Simulationsmodells zu Betriebsstrategien von Hausbatteriespeichern und deren Wirtschaftlichkeit. Dabei werden die getroffenen Annahmen und verwendeten Daten für den Strombedarf des Haushalts und die Leistung der Photovoltaikanlage erklärt. Im Anschluss an die Beschreibung der theoretischen Modellbildung wird die Implementierung des Modells erläutert. Nach der Auswertung der Resultate des Simulationsmodells wird auf mögliche Modellerweiterungen eingegangen. Handlungsempfehlungen in Kapitel 5 sowie ein zusammenfassendes Fazit mit einem Ausblick auf weitere, mögliche Entwicklungen in Kapitel 6 schließen die Arbeit ab. Unterstützend wird der Aufbau dieser Arbeit in Abbildung 1.1 grafisch dargestellt.



Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

Quelle: Eigene Darstellung

6 Fazit und Ausblick

Ziel der Arbeit war es, vor dem Hintergrund der notwendigen Flexibilisierung des Stromerzeugungssystems aus der Gegenüberstellung von Stromspeichersystemen und ihren Anwendungsgebieten eine Kombination mit wirtschaftlichem Potential für die Zukunft zu identifizieren und für diese Kombination mithilfe eines selbst entwickelten Simulationsmodells detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnungen und technische Analysen durchzuführen. Im weiteren Verlauf werden die in der einleitenden Zielsetzung formulierten Forschungsfragen beantwortet.

Zunächst wurde der Frage nachgegangen, welche Stromspeichersysteme sich hinsichtlich ihrer technischen Parameter für welche Anwendungen in energiewirtschaftlichen Märkten eignen. Damit zusammenhängend sollte die Wirtschaftlichkeit eines Einsatzes im jeweiligen Markt untersucht werden.

Für den Handel am Terminmarkt sind saisonale Speichersysteme wie Power-to-Gas-Systeme technisch geeignet, während für den kurzfristigeren Handel am Spotmarkt auch Tagesspeicher wie Pump- und Druckluftspeicher sowie Batteriespeicher geeignet sind. In beiden Strommärkten ist aufgrund niedriger erzielbarer Spreads keine wirtschaftliche Teilnahme für Stromspeicher möglich.

Die Systemdienstleistung Bereitstellung von Regelleistung unterteilt sich entsprechend den drei Regelleistungsarten Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserve. Für die Bereitstellung von Primärregelleistung eignen sich Batteriespeicher und alle in dieser Arbeit betrachteten mechanischen Stromspeichersysteme. Die durch die Vorhaltung und Lieferung von Regelleistung erzielbaren Erlöse sind für erste Batteriespeicher bereits ausreichend hoch, um rentabel zu sein. Dennoch ist das Potential für Batteriespeicher in diesem Markt aufgrund der geringen ausgeschriebenen Regelleistungsmengen begrenzt. Für die Bereitstellung von Sekundärregelleistung und Minutenreserve kommen Schwungradspeicher im Gegensatz zu den anderen mechanischen Stromspeichersystemen aufgrund der großen benötigten Speicherkapazitäten nicht mehr in Frage. Indessen weisen Power-to-Gas-Systeme ausreichend kurze Startzeiten auf. Außer für negative Sekundärregelleistung war die Bereitstellung von Sekundärregelleistung und Minutenreserve durch Stromspeicher bislang nicht wirtschaftlich. Die Systemdienstleistungen Bereitstellung von Blindleistung und Schwarzstartreserve können von fast allen Stromspeichersystemen erbracht werden (siehe dazu Tabelle 3.3). Allerdings existieren in Deutschland bisher keine eigenständigen Märkte für Blindleistung und Schwarzstartreserve, weshalb Stromspeicher diese Systemdienstleistungen nicht separat vermarkten können.

Der Fokus der betrachteten Anwendungen von Stromspeichersystemen für Privatkunden wurde auf Hausbatteriespeichern als Ergänzung zu Photovoltaikanlagen gelegt. Hierfür eignen sich aufgrund der hohen Energiedichte und des hohen Zyklen-

wirkungsgrades vor allem Lithium-Ionen-Batterien. Der finanzielle Nutzen von Hausbatteriespeichern zur Eigenversorgung liegt in der Einsparung von Strombezugs-kosten. Je größer die Differenz von Strompreis und EEG-Einspeisevergütung, desto mehr Strombezugs-kosten können bei Eigenverbrauch des Solarstroms eingespart werden. Zum jetzigen Zeitpunkt sind zusätzlich zu Photovoltaikanlagen installierte Hausbatteriespeicher für die meisten Haushalte nicht wirtschaftlich. Jedoch wird erwartet, dass Hausbatteriespeicher in naher Zukunft aufgrund stark sinkender Anschaffungskosten für Lithium-Ionen-Speicher sowie einer steigenden Differenz von Strompreis und EEG-Einspeisevergütung wirtschaftlich werden.

Zum Schluss wurde die Vermeidung von konventionellem Verteilnetzausbau betrachtet, wofür insbesondere Batteriespeicher technisch geeignet sind. Andere Netzausbaupoptionen wie z. B. intelligente Netztechnologie oder eine Abregelung der Leistungseinspeisung aus erneuerbaren Energien werden allerdings meist als wirtschaftlicher als der Einsatz von Batteriespeichern eingeschätzt.

Aus der Gegenüberstellung von Anwendungsgebieten und dafür technisch geeigneten Stromspeichersystemen (Tabelle 3.3) wird der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien als Solarstromspeicher im Privatkundenbereich als Forschungsfeld mit wirtschaftlichem Zukunftspotential identifiziert. Demnach wurden mithilfe eines selbst entwickelten Simulationsmodells detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnungen und technische Analysen zu Hausbatteriespeichern durchgeführt. Insgesamt zeigt die Auswertung der Resultate des Simulationsmodells, dass Hausbatteriespeicher bis zu einer nutzbaren Speicherkapazität von 4,0 kWh einen positiven Kapitalwert aufweisen, zu einem gegenwärtigen Inbetriebnahmezeitpunkt am 01.12.2015 eine Photovoltaikanlage ohne Stromspeicher (Alternative 1) jedoch wirtschaftlich vorteilhafter ist. Im Folgenden werden die Forschungsfragen zu Hausbatteriespeichern und ihrer Wirtschaftlichkeit beantwortet.

Vor dem Hintergrund der aktuellen Gesetzeslage des EEG sowie eines Förderprogramms der KfW-Bank für Batteriespeichersysteme mit dem übereinstimmenden Ziel, die Stromnetze durch eine Reduzierung der Netzeinspeisung zu entlasten, werden zwei verschiedene Betriebsstrategien von Batteriespeichern verglichen. Das Betriebsverhalten von Batteriespeicher und Photovoltaikanlage bei der Betriebsstrategie mit fester Einspeisebegrenzung durch Abregelung (Alternative 2) unterscheidet sich von der Betriebsstrategie mit prognosebasierter dynamischer Einspeisebegrenzung (Alternativen 3 und 4). Während die erste Betriebsstrategie die Abregelungsverluste, welche auch beim alleinigen Betrieb der Photovoltaikanlage entstehen, durch einen Batteriespeicher kaum reduzieren kann, ist die Vermeidung von Abregelungsverlusten bei der zweiten Betriebsstrategie möglich. Da die Netzeinspeiseleistung nicht abrupt ansteigt und der Maximalwert geringer ist, trägt die Betriebsstrategie mit prognosebasierter dynamischer Einspeisebegrenzung mehr zur Netzentlastung bei. Wie

Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8 entnommen werden kann, unterscheiden sich Lade- und Entladeprofil des Batteriespeichers je nach Betriebsstrategie, sodass der maximale Speicherfüllstand zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht wird.

In bisherigen Untersuchungen von prognosebasierten Betriebsstrategien wurden meist Prognosedaten ohne Prognosefehler, also ideale Prognosen, verwendet. Deshalb wurde in dieser Arbeit der Einfluss von Prognosefehlern realer Prognosen untersucht. Prognosefehler bezüglich der Last des Haushalts und der PV-Leistung eines Tages äußern sich in einer Unterschätzung bzw. einer Überschätzung der täglichen Leistungsüberschüsse. Dadurch wird die optimale Einspeisegrenze zu niedrig bzw. zu hoch gesetzt. Es kommt entweder zu Abregelungsverlusten bei zu früh startender Batterieladung oder zu Einspeicherverlusten bei zu spät startender Batterieladung (siehe dazu Abschnitt 4.7.1.2).

Soll trotz der Tatsache, dass gegenwärtig eine Photovoltaikanlage ohne Batteriespeicher die vorteilhafteste Alternative ist, ein Batteriespeicher im Haushalt installiert werden, erlaubt die Auswertung wirtschaftlicher und technischer Ergebnisgrößen die wirtschaftlich vorteilhafte Speicherdimensionierung für die jeweilige Betriebsstrategie für einen Haushalt in einem Wohnblock, Mehr- oder Einfamilienhaus. Aus Tabelle 4.3 geht hervor, dass das Fallbeispiel für die Dimensionierung unerheblich ist, also ob ein Haushalt in einem Wohnblock, Mehr- oder Einfamilienhaus betrachtet wird. Nicht unerheblich ist dagegen die Betriebsstrategie des Batteriespeichers, also die Alternative. Die nutzbare Speicherkapazität beträgt bei den Alternativen 2 und 3 jeweils 2,8 kWh, bei Alternative 4 beträgt sie 2,4 kWh. Die Lade- bzw. Entladeleistung beträgt jeweils 1,4 kW bzw. 1,2 kW. Bei diesen Dimensionierungen weisen die Kapitalwerte der Alternativen 1 bis 4 Werte in Höhe von 7.467 €, 3.054 €, 2.875 € und 3.045 € auf.

Die sich an die Speicherdimensionierung anschließende Forschungsfrage zielt auf das durch den Einsatz eines Batteriespeichers veränderte Strombezugsverhalten von Haushaltskunden. Der Eigenverbrauchsanteil kann für einen Haushalt in einem Wohnblock bei Alternative 1 durch einen Batteriespeicher bei den gewählten Dimensionierungen von 42,3 % auf 59,7 % gesteigert werden, der Autarkiegrad von 39,8 % auf 54,4 %. Für den Stromversorger reduziert sich durch den auf 45,6 % verringerten verbleibenden Strombedarf die Stromlieferung an die Haushaltskunden von 2.649 kWh auf 2.006 kWh pro Jahr. Die Betriebsstrategie mit dynamischer Einspeisebegrenzung und idealen Prognosen kann die maximale Netzeinspeisung für Fallbeispiel 3 von 60 % bis auf 46,2 % bei 4,4 kWh und bis auf 53,2 % bei der gewählten Dimensionierung von 2,8 kWh senken. Da nur diese Betriebsstrategie die maximale Netzeinspeisung unter 60 % senken kann, ist sie aus Sicht des Netzbetreibers gegenüber anderen Betriebsstrategien zu bevorzugen.

Des Weiteren sollte erforscht werden, in welcher zeitlichen Perspektive und unter welchen Bedingungen Hausbatteriespeicher eine wirtschaftlich vorteilhafte Ergänzung zu Photovoltaikanlagen von Haushaltskunden darstellen können. Der Vergleich von Szenarien mit verschiedenen Inbetriebnahmejahren der Anlagen ergibt, dass im Szenario 2020 im Gegensatz zu den Szenarien 2015 und 2018 ein zusätzlich installierter Hausbatteriespeicher mit 4,4 kWh wirtschaftlich vorteilhaft ist. Es wurde angenommen, dass die Anschaffungsausgaben des Batteriesystems und des PV-Systems weiter sinken und mit 900 €/kWh bzw. 800 €/kWp in das Szenario eingehen. Durch das Erreichen des Photovoltaik-Zubauziels ist die EEG-Vergütung für Solarstrom in diesem Jahr bereits ausgelaufen. Dementsprechend wird im Szenario 2020 der EEG-Einspeisevergütungssatz mit 0 ct/kWh angenommen.

Die abschließende Forschungsfrage bezieht sich auf die Erkenntnisse über Batteriespeicher im Gewerbekundenbereich, die mithilfe des Simulationsmodells gewonnen werden können. Ein zusätzlich installierter Batteriespeicher ist für den betrachteten Gewerbebetrieb gegenwärtig wirtschaftlich nicht vorteilhaft. Dies könnte sich ändern, wenn der Batteriespeicher, statt zur Eigenverbrauchsoptimierung, zur Kappung von Lastspitzen eingesetzt würde.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass unter rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten momentan auf die Installation eines Batteriespeichers verzichtet werden sollte. Gründe für Privathaushalte dennoch einen Batteriespeicher zu installieren, können gesunkene Anlagenpreise sowie ein Streben nach Autarkie sein. Dabei ist die Betriebsstrategie mit fester Einspeisebegrenzung durch Abregelung wirtschaftlich vorteilhafter als die Betriebsstrategie mit prognosebasierter dynamischer Einspeisebegrenzung. Unter der Bedingung, dass die für das Szenario 2020 getroffenen Annahmen eintreten werden, ist ein ergänzend zu einer Photovoltaikanlage installierter Hausbatteriespeicher mit 4,4 kWh in diesem Jahr die wirtschaftlich vorteilhafteste Alternative. Insgesamt betrachtet haben die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit positiv zur Beantwortung der eingangs formulierten Forschungsfragen beigetragen.

Abschließend wird ein Ausblick bezüglich der Modellbildung des Simulationsmodells sowie der zukünftig möglichen Fortschritte hinsichtlich der Erstellung von Last- und PV-Leistungsprognosen gegeben.

In Bezug auf die Modellbildung des Simulationsmodells kann zunächst an den in Abschnitt 4.7.2.1 benannten Limitationen der Optimierungsalgorithmen zur Ermittlung der optimalen Einspeisegrenze angesetzt werden. Eine Verbesserung der Algorithmen wird zu einer höheren Nutzung der Speicherkapazität und damit zu höheren Kapitalwerten der Betriebsstrategie mit prognosebasierter dynamischer Einspeisebegrenzung führen. Diese Betriebsstrategie kann das gesamte Potential des Batteriespeichers zur Netzentlastung nutzen, weist allerdings Defizite bei der Verwendung

realer Prognosen auf. Die in dieser Arbeit verwendete Methode der Prognoseerstellung, die Methode der Persistenz-Prognose, kann in weiterführenden Untersuchungen anderen Prognosemethoden gegenübergestellt werden, die z. B. verhindern, dass Einzelereignisse direkt in die Prognose einfließen.

Die Erstellung von PV-Leistungsprognosen weist Optimierungspotential auf. Bislang werden statistische Wettermodelle mit Standortparametern der Photovoltaikanlage kombiniert, wozu Neigung, Ausrichtung und Typ der PV-Module gehören. Es existieren bereits neue Prognoseansätze, die Berechnungen zur erwarteten Leistung aller in Deutschland installierten Photovoltaikanlagen mit den statistischen Wettermodellen abgleichen.²³⁵ Derartige Prognoseansätze der Kombination statistischer Modelle mit Echtzeitdaten können die Genauigkeit von PV-Leistungsprognosen signifikant erhöhen. Um eine Verbesserung der Lastprognosen zu erzielen, bietet sich in der Zeit von Smart-Home-Systemen, also Systemen, die durch vernetzte und fernsteuerbare Geräte eine effiziente Energienutzung in Haushalten ermöglichen, die standardisierte Verwendung von Smart Metern an. Diese intelligenten Stromzähler ermöglichen es, durch aktuelle Verbrauchsdaten die Lastprognose des Haushalts auch untertägig zu korrigieren. Entsprechend dazu können untertägig durchgeführte Optimierungsrechnungen die optimale Einspeisegrenze im Tagesverlauf anheben oder senken.

Die Möglichkeiten zur Optimierung von Last- und PV-Leistungsprognosen gehen mit einer Vergrößerung der zu verarbeitenden Datenmengen und komplexeren Berechnungen einher. Sollen sehr große Datenmengen in das Simulationsmodells importiert oder rechentechnisch aufwendige Erweiterungen im Modell implementiert werden, kann zur Ausführung des Programms ein leistungsstarker Server verwendet werden. Diesbezüglich besteht die vergleichsweise preisgünstige Möglichkeit, einen sogenannten Cloud Server für einen gewünschten Zeitraum zu mieten.

Das Potential des intelligenten Zuhauses wird in Zukunft weiter ausgeschöpft werden müssen. Denn unabhängig davon, wie genau eine prognosebasierte Betriebsstrategie modelliert werden kann, wird langfristig der Ausgleich von Stromerzeugung und -verbrauch ein wichtiger Aspekt, nicht nur für die Wirtschaftlichkeit der Stromversorgung, sondern auch für die Versorgungssicherheit sein. Das Stromerzeugungssystem der Zukunft muss wirtschaftlich effizient arbeiten, dabei als ökologisch nachhaltig angesehen werden und gesellschaftlich akzeptiert sein. In der Energiewende wird die Frage der Speicherung von Strom dauerhaft ein Thema bleiben.

²³⁵ Vgl. Rentzing 2015.