

Battery Storage in Low-Carbon Energy Systems

Deployment and Data-Driven Operation Strategies

Dissertation

Sarah Henni, Karlsruher Institut für Technologie (Betreuung: Prof. Dr. Christof Weinhardt)

sarah.henni@kit.edu | 0163/7353331

In künftigen kohlenstoffarmen Energiesystemen werden Batteriespeichersysteme (BESS) eine entscheidende Rolle bei der Überbrückung der zeitlichen Lücke zwischen der intermittierenden Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und unflexiblem Verbrauch spielen. BESS werden auf allen Ebenen von Energiesystemen eingesetzt werden, z.B. als Heimspeicher in Privathaushalten, als kommunale Quartierspeicher in Nachbarschaften oder als Netzspeicher im Übertragungsnetz (siehe Abb.1). Auf jeder dieser Ebenen sind unterschiedliche Akteure und Speicherbetreiber tätig, sodass bei der Planung des Einsatzes von BESS und der Entwicklung entsprechender Betriebsstrategien unterschiedliche Anforderungen berücksichtigt werden müssen.

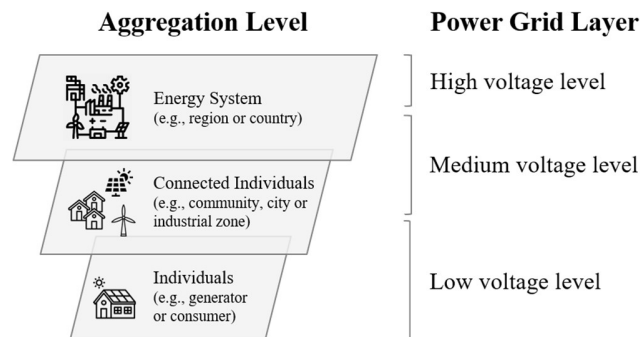


Abb. 1: Aggregationsebenen von Energiesystemen

In der vorliegenden Dissertation werden der Einsatz und der Betrieb von BESS aus einer ganzheitlichen Perspektive untersucht. Im ersten Teil der Arbeit wird der Einsatz von BESS auf den verschiedenen Ebenen von Energiesystemen analysiert und im zweiten Teil werden entsprechende datengesteuerte Betriebsstrategien entworfen und bewertet.

Die inhaltliche Analyse beginnt in Kapitel 3 auf der Ebene der Haushalte mit einer Verhaltensstudie, die darauf abzielt, die Energiekompetenz von Hausbesitzern und Gebäudemanagern zu erhöhen. Hierzu wird evaluiert, inwiefern eine

Energieinformationswebsite zur Steigerung der Energiekompetenz bei Nicht-Experten beitragen kann. Die Energieinformationswebsite ermöglicht die spielerische Erkundung von energiebezogenen Technologien in Gebäuden, wie bspw. Solaranlagen und Batteriespeicher. Der Fokus liegt dabei auf interaktiven und animierten Designelementen der Website. In einer Experimentalstudie mit zwei Treatmentgruppen wird die Nutzung der animierten Website mit der Nutzung einer statischen Website verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die animierten Designelemente zu einer höheren Bereitschaft führen, eine solche Website zu nutzen und weiterzuempfehlen. Die Nutzer:innen berichten außerdem einen höheren wahrgenommenen Wissenszuwachs.

Heimspeichersysteme in Haushalten haben in den vergangenen Jahren signifikant zum Ausbau von Batteriespeicherkapazitäten in Deutschland beigetragen. Allerdings wird ihr Potential durch die Nutzung in einem einzelnen Haushalt oft nicht vollständig ausgenutzt. Auf der Ebene von Energiegemeinschaften wird in Kapitel 4 daher ein Sharing Economy Modell für die gemeinsame Nutzung von Speicherkapazitäten in Nachbarschaften, bestehend aus mehreren Prosumern und Konsumenten, untersucht. Die Simulation von 520 Sharing-Gemeinschaften mit jeweils fünf Haushalten zeigt, dass die BESS-Nutzung um durchschnittlich 14% gesteigert werden kann und die Gemeinschaften einen durchschnittlichen Jahresgewinn von 615€ erzielen können. Darüber hinaus wird ein festes Tarifschema, das eine gerechte Verteilung der Gewinne innerhalb der Gemeinschaft gewährleistet, entworfen und diskutiert.

Um passende Anreizsysteme für Heim- und Quartierspeicher zu designen, muss auf Systemebene untersucht werden, wie hoch der Batteriespeicherbedarf eines Energiesystems ist. Daher wird in Kapitel 5 eine bottom-up Methodik zur Bestimmung des Batteriespeicherbedarfs in integrierten Energiesystemen entwickelt, die es ermöglicht, dezentrale Strukturen zu berücksichtigen (Abb. 2). In einer Fallstudie für den Bundesstaat Baden-Württemberg werden ein dezentraler und ein zentraler Planungsansatz verglichen. Hierbei wird gezeigt, dass für einen erneuerbaren Anteil von 95% bei zentraler Planung 6,8 GWh BESS-Energiekapazität erforderlich sind, während bei dezentraler Planung 128 GWh benötigt werden. Die Stromgestehungskosten verdoppeln sich von 42 € pro MWh bei zentraler Planung auf 94 € pro MWh bei dezentraler Planung. Die Verwirklichung der niedrigen Kosten einer zentralen Planung würde jedoch eine extreme Konzentration der erneuerbaren Erzeugungskapazitäten auf wenige ausgewählte Regionen in Baden-Württemberg zur Folge haben. Im Zuge von Akzeptanzproblemen sollten dezentrale Alternativen mit einer gleichmäßigeren Verteilung der benötigten Erzeugungskapazitäten daher berücksichtigt werden. Ein zwischen dezentralem und zentralem Planungsansatz liegender „Mittelweg“ führt zu einem Speicherbedarf von 52 GWh und Stromgestehungskosten von 64 € pro MWh.

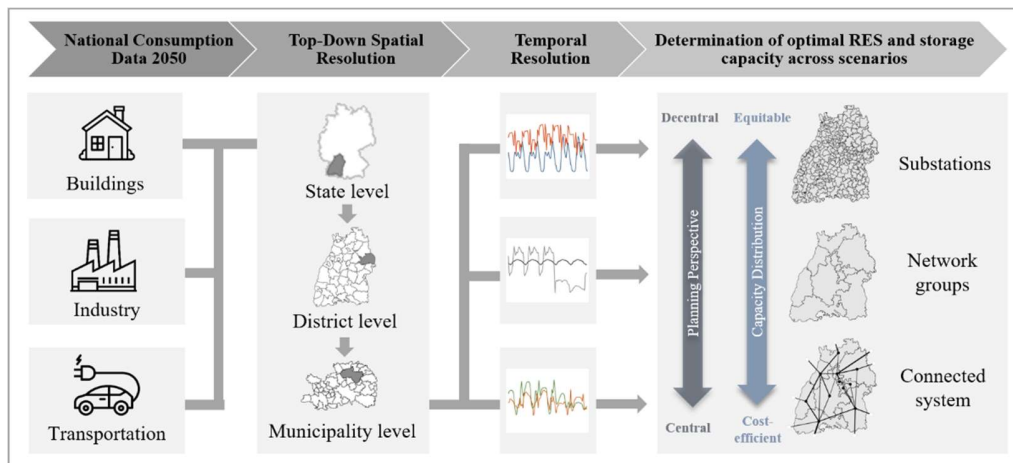


Abb.2: Methodik zur Modellierung des Batteriespeicherbedarfs unter Berücksichtigung dezentraler Strukturen

Im ersten inhaltlichen Teil wurde der Einsatz von Batteriespeichern auf unterschiedlichen Aggregationsebenen untersucht sowie der optimale Bedarf an Batteriespeichern berechnet. Für eine effektive Nutzung der benötigten Speicher-Ressourcen sind Online-Betriebsstrategien erforderlich, um Unsicherheiten zu beseitigen, die im Echtzeitbetrieb zu Ineffizienzen führen. Daher werden im zweiten inhaltlichen Teil der Arbeit datengesteuerte Betriebsstrategien für den Echtzeitbetrieb von BESS entwickelt, bewertet und diskutiert. Dabei werden die unterschiedlichen Anforderungen von Speicherbetreiberinnen berücksichtigt, die an verschiedenen Behind-the-Meter (BTM) und Front-of-the-Meter (FTM) Anwendungsfällen beteiligt sind.

In Kapitel 6 wird zunächst die Perspektive der Betreiberin eines großen Solarparks eingenommen, die einen Netzspeicher nutzt, um die Risiken der Direktvermarktung ihrer Erzeugung auf dem Day-Ahead-Spotmarkt zu verringern. Die Ergebnisse zeigen, dass eine auf einer Klassifizierung basierenden heuristische Betriebsstrategie das Risiko der Betreiberin reduzieren kann. Der Conditional Value at Risk kann zwischen 28% und 57% und im Durchschnitt um 38,5% reduziert werden.

Auch bei Anwendungen hinter dem Zähler spielt Risiko eine wichtige Rolle für Batteriebetreiberinnen in Industrieanlagen. Hier können BESS zur Reduzierung von Lastspitzen eingesetzt werden. Um die Profitabilität zu erhöhen wird in der Literatur oft eine Kombination mit der Bereitstellung von Primärregelleistung untersucht. Dies birgt jedoch ein höheres Risiko, entscheidende Lastspitzen zu verpassen. In Kapitel 7 wird daher eine Betriebsstrategie für Industriespeicher entwickelt, die eine Risikoabschätzung beinhaltet. Dazu wird die Spitzenlast des Folgetages per probabilistischem Forecast ermittelt, bevor der Primärregelleistungseinsatz des Speichers geplant wird. Es kann gezeigt werden, dass risikoaverses Planungsverhalten in den untersuchten Fallstudien von vier Unternehmen keine oder nur geringe negative

Auswirkungen auf die jährlichen Profite der Speicherbetreiberin hat. Nur bei einem Unternehmen der Fallstudie führt die Planung auf dem 95. Prognoseperzentil zu 10% geringeren Gewinnen, wobei das Risiko, einen kritischen Peak zu verpassen, deutlich reduziert wird. In einem weiteren Fall führt ein moderates risikoaverses Planungsverhalten (d.h. Planung auf dem 75. oder 90. Prognoseperzentil) sogar zu einer leichten Erhöhung des Jahresgewinns um 3%, da Zeiten mit Lastspitzen besser antizipiert werden können.

Die Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichern kann weiter gesteigert werden, indem mehrere BTM und FTM Anwendungsfälle kombiniert werden. Hierbei muss mit mehreren Unsicherheiten sowie dem Trade-off zwischen den Anwendungsfällen umgegangen werden. Um diese Herausforderung zu lösen, wird in Kapitel 8 eine Deep Reinforcement Learning basierte Betriebsstrategie für Batteriespeicher entwickelt. In der Fallstudie eines Quartierspeichers, der vier Anwendungsfälle (Eigenverbrauchserhöhung, Peak-Shaving, Spotmarkthandel und Regelleistungsbereitstellung) kombiniert, kann gezeigt werden, dass die entworfene Strategie 10 bis 28% höhere jährliche Gewinne erzielt als vergleichbare regelbasierte Benchmark-Strategien.

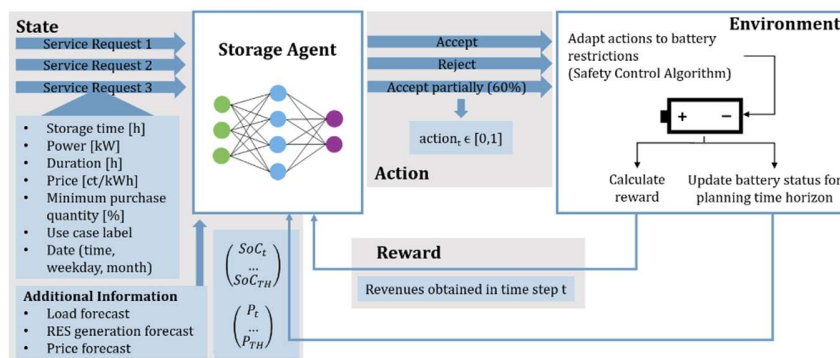


Abb. 3: Schema der Deep Reinforcement Learning-basierten Betriebsstrategie

Zusammenfassend analysiert und empfiehlt die vorliegende Dissertation Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes von BESS in Energiesystemen mit intermittierender erneuerbarer Erzeugung. Die Ergebnisse unterstützen politische Entscheidungsträgerinnen bei der Gestaltung entsprechender Regulierungsansätze, Aggregatorinnen und Speicherbetreiberinnen durch die Bereitstellung von Betriebsstrategien und Forscherinnen bei der Gestaltung zukünftiger kohlenstoffarmer Energiesysteme. Dadurch trägt diese Arbeit zur Förderung und effizienten Nutzung von Batteriespeicherressourcen bei und unterstützt somit die Integration eines hohen Anteils an nachhaltiger Erzeugung in kohlenstoffarme Energiesysteme.