



■ Gilbert Fridgen
Leon Haupt

Batterien als Schlüsseltechnologie

Interdisziplinäre Batterieforschung verhilft der Energiewende zum Erfolg

■ *Futuristische Darstellung eines Energieparks, der die Erzeugung erneuerbarer Energien und die Energiespeicherung durch Batterien integriert (sst).*

Spätestens seit der Katastrophe in Fukushima im Jahr 2011 stellte sich in Deutschland auch der politische Wille dahingehend ein, unser heutiges, auf konventioneller Erzeugung basierendes Energiesystem zu transformieren. Der im Januar 2019 beschlossene Kohleausstieg ist ein weiterer irreversibler Schritt auf dem Weg zu einer Stromversorgung, die von erneuerbaren Energien dominiert wird. Insbesondere Wind- und Solarenergie spielen eine gewichtige Rolle, um konventionelle Kraftwerkstypen zu ersetzen. Im Elektrizitätssektor wird diese Entwicklung besonders deutlich: Im Jahr 2018 erreichte der in Europa aus erneuerbaren Energien produzierte Stromanteil ein Rekordhoch von 32,3 Prozent.¹ Tendenz steigend.

Doch gerade die Windkraft und Photovoltaik (PV), die Hoffnungsträger der Energiewende, bereiten den Netzbetreibern die größten Sorgen – und das in vielerlei Hinsicht: Die starke Volatilität in der Stromerzeugung aus Wind und Sonne, in Kombination mit der Unsicherheit über kurzzeitige Witterschwankungen, führt zu Systeminstabilitäten. Um das Stromnetz nämlich stabil zu halten, muss zu jedem Zeitpunkt die ins Stromnetz eingespeiste Strommenge der abgenommenen Menge bzw. dem Stromverbrauch entsprechen. Bisher begegnet man der Volatilität auf der Seite des Stromverbrauchs durch Ab- und Zuregelung der Stromerzeugung, die in der Regel von konventionellen Kraftwerken (Kohle, Gas etc.) geleistet wird. Erneuerbare Energien, die die fossilen Kraftwerkstypen Schritt für Schritt ersetzen sollen, sind allerdings nur eingeschränkt regelbar und können kurzfristige, verbrauchsbedingte Fluktuationen nur bedingt ausgleichen. Hinzu kommt, dass die Erzeugung von PV-Strom, die aufgrund der Sonneneinstrahlung eine Produktionsspitze zur Mittagszeit hat, nur zum Teil mit den Verbrauchshöchstlasten am frühen Morgen und am Abend zusammenfällt.

Darüber hinaus treten Stromnetzengpässe auf, wenn beispielsweise in der Nordsee starker Wind weht und der erzeugte Strom nur bedingt vor Ort verwendet werden kann. Dann muss der Strom entsprechend aus dem Norden Deutschlands in die industriellen Zentren im Süden und am Rhein transportiert werden. Zu den Fluktuationen im Tagesverlauf kommen noch saisonale Schwankungen und das Risiko einer Dunkelflaute hinzu. Hierbei handelt es sich um ein Wetterphänomen, das mehrere Tage andauern kann und die Versorgungssicherheit von Stromnetzen aufgrund von schwachem Wind und fehlender Sonneneinstrahlung auf die Probe stellt.

Elektrochemische Speichersysteme als Lösungsbaustein

Existierende Pumpspeicherwerke kompensieren diese Schwankungen bereits, können aber die Nachfrage nach Energiespeichern nicht auffangen. Dies liegt zum einen am schnellen Zubau von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien, zum anderen auch daran, dass das Potenzial von Pumpspeicherkraftwerken in Europa beschränkt ist. Batteriespeicher können in dieser Situation entscheidend zur Problemlösung beitragen, indem sie

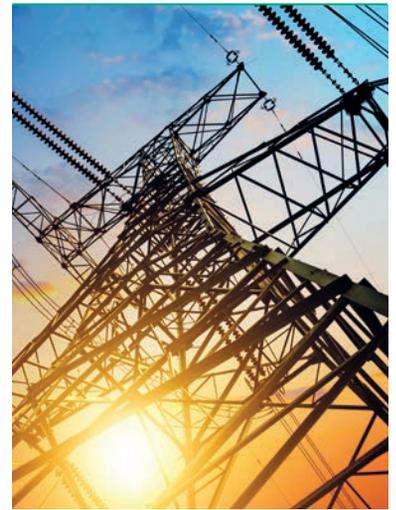
- Netzengpässe im Millisekundenbereich ausgleichen,
- den Überschuss, der tagsüber durch PV-Anlagen erzeugt wird, auf abendliche Hochlastzeitfenster verlagern
- und sogar durch Dunkelflauten hervorgerufene, saisonale Erzeugungengpässe abschwächen.

Batteriespeicher sind für nahezu alle Anwendungsfelder im Elektrizitätssektor attraktiv: Sie sind flexibel dimensionierbar, können viel Energie in kurzer Zeit laden bzw. entladen und sind in der Lage, über längere Zeiträume große Mengen Energie zur Verfügung zu stellen.

Batteriespeicher als Schlüsseltechnologie der Elektromobilität

Im Bereich der Materialien tritt neben Blei (Pb) und Nickel-Metallhydrid (NiMH) insbesondere Lithium als Basis für Batteriespeicher² in den Vordergrund. Ein wesentlicher Vorteil von Lithium-Ionen-Batterien ist nämlich die – im Vergleich zu anderen nicht-fossilen Lösungen – recht hohe gravimetrische Energiedichte. Diese beschreibt, wie viel Energie pro Kilogramm an Masse in der Batterie gespeichert werden kann. Mit den aktuellen Technologieentwicklungen geht eine steigende Nachfrage seitens der Elektromobilitätsbranche einher. Diese ist ständig auf der Suche nach effizienten Methoden, um die Reichweite von Elektroautos zu erhöhen, gleichzeitig deren Gewicht und damit auch die Kosten zu beschränken und somit den Paradigmenwechsel hin zum elektrischen Fahren erfolgreich meistern zu können.

Wie erleben zurzeit einen Nachfragesog, bei dem Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten durch die Nachfrage seitens der Kunden induziert sind. Dieser „Market-Pull“ wird mit einer extrem schnell wach-



■ Abb. 1: Elektrischer Hochspannungsmast (sst).

¹ Vgl. Agora Energiewende: The European Energy Transition 2030: The Big Picture. Ten Priorities for the next European Commission to meet the EU's 2030 targets and accelerate towards 2050. Berlin 2019; dazu die Pressemitteilung von Agora Energiewende: "Das große Bild einer Europäischen Energiewende 2030", 6. März 2019, www.agora-energiewende.de.

² Hier gilt es zwischen Subkategorien von Lithium-Technologien zu unterscheiden. Diese umfassen unter anderem Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC), Lithium-Mangan-Oxid (LMO), Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid (NCA), Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) und Lithium-Titanat (LTO).

senden Produktionskapazität von Lithium-basierten Batterien beantwortet. Allein chinesische und amerikanische Batteriezellhersteller planen ihre Produktion bis 2030 um knapp 400 Prozent auf mehr als eine Terawattstunde (TWh) Speicherkapazität zu erweitern. Darin manifestiert sich eine Entwicklung, die Batterien zu einer Schlüsseltechnologie im 21. Jahrhundert macht und erwartungsgemäß die Produktionskosten für Batterien noch weiter sinken lässt.

Vielseitige Anwendung für stationäre Stromspeichersysteme

Die sinkenden Batteriepreise wirken sich ebenfalls auf den Markt für stationäre Batteriespeichersysteme aus. Um Batterieprojekte dennoch ökonomisch sinnvoll betreiben zu können, braucht es Geschäftsmodelle, die mehrere Anwendungsfälle durch sogenanntes „Stacking“ intelligent bündeln und sich somit verschiedener Einnahmequellen bedienen. Nach aktuellem Stand gibt es grundsätzlich vier Möglichkeiten, die von Batteriespeichern bereitgestellten Flexibilitäten zu vermarkten:

- **Marktdienlichkeit:** Beim marktdienlichen Betrieb hat der Arbitragehandel auf den Elektrizitätsmärkten, dem Day-Ahead- und dem Intraday-Markt, Priorität. Hierbei lädt die Batterie in Zeitintervallen mit niedrigen Preisen und entlädt, wenn die Stromknappheit groß und somit die Preise am höchsten sind.
- **Systemdienlichkeit:** Beim systemdienlichen Betrieb nimmt die Batterie am Regelleistungsmarkt teil und hält Kapazität zur Stabilisierung des Stromnetzes vor. Je nach Dimension und Reaktionszeit des Systems kann hier der Primär-, Sekundär- oder Minutenregelleistungsmarkt beliefert werden.
- **Netzdienlichkeit:** Während der systemdienliche Betrieb auf die Stabilisierung des Stromnetzes auf Bundes- und Europaebene abzielt, hat der netzdienliche Betrieb der Batterie einen anderen Fokus: Hier stehen das lokale Verteilnetz und lokale Dienstleistungen, zum Beispiel das lokale Engpassmanagement, im Vordergrund. Letzteres wird im Kontext eines fortschreitenden Ausbaus dezentraler erneuerbarer Energien und steigender Akzeptanz von Elektroautos zunehmend wichtig, da Leitungsempässe im Verteilnetz häufiger auftreten werden. Die Bereitstellung von Batterieflexibilität stellt hier eine Alternative zum bisherigen teuren Netzausbau dar.

- **Eigenoptimierung:** Schließlich spielen Batterien auch für die Optimierung des eigenen Energiemanagements eine zunehmend wichtige Rolle, um Stromkosten zu senken. Dies gilt sowohl für Industrien und kommunale Anlagen als auch für Eigenheime (Smart Homes). Eine Kostensenkung kann durch Erhöhung der Eigenversorgung aus lokalen erneuerbaren Energien, durch die Reduzierung der jährlichen Spitzenlast oder durch die Nutzung volatiler Strompreise erreicht werden. Intelligente Batteriespeicher versprechen eine Absicherung gegen immer stärker schwankende Strompreise.

Hindernisse für stationäre Speichersysteme in Ökonomie und Regulatorik

Um die für die Energiewende erforderliche Menge an Stromspeichern in das Netz zu bekommen, bedarf es allerdings noch eines deutlichen Ausbaus. Dieser ist aufgrund der aktuellen Ökonomie von Batteriespeicherprojekten nur schwach ausgeprägt. Die Gründe hierfür können in endogene (technologieabhängige) und exogene (marktliche, regulatorische und soziale) Faktoren unterteilt werden:

Endogene Faktoren sind technologieabhängige Hindernisse, die hauptsächlich durch Forschung und Entwicklung mit dem Ziel besserer Batterietechnologien verringert oder beseitigt werden können. Die nötigen Forschungs- und Entwicklungsschritte betreffen unter anderem die Batteriezellkosten sowie die Effizienz, Lebensdauer, zyklische Degradierungsrate, Selbstentladung, Ressourcenkritikalität und Rezyklierbarkeit. Auf der anderen Seite stehen *exogene* Hürden, welche durch marktliche, regulatorische und soziale Faktoren geprägt sind. In Deutschland ist die ökonomische Attraktivität hauptsächlich durch folgende Rahmenbedingungen beschränkt:

- Tägliche Preisschwankungen auf dem Strommarkt kommen nur bedingt bei den Verbrauchern an. Der hohe Fixkostenanteil (Stromsteuern, Netzentgelte, EEG-Umlage etc.) nivelliert die Preisschwankungen, schwächt die finanziellen Anreize zum marktdienlichen Betrieb und senkt somit die Gewinnmarge der Batterie.
- Die Sonderrolle der Batterie als Verbraucher und zeitlich verzögerter Erzeuger ist in der Regulatorik noch nicht komplett abgebildet. Dies führt zu einer Doppelbesteuerung: Sowohl das Laden als auch das Entladen löst entsprechende Abgaben aus. Dadurch werden markt-, system- und



■ Abb. 2: Batteriesystem in einem Energiepark (sst).



■ Abb. 3: E-Mobilität auf dem Campus der Universität Bayreuth (Foto: Christian Wißler).

netzdienliche Einsätze erschwert, die potenziellen Erträge eines Batterieprojektes sinken.

- Fehlende Vergütungsmechanismen für die Netzdienlichkeit beeinträchtigen die Planbarkeit von Batterieprojekten. Vernetzte Heimspeicher können aber eine entscheidende Rolle für das lokale Management von Netzengpässen spielen und somit den Bedarf an Investitionen in den Netzausbau verringern. Allerdings sind die dadurch erzielten Einsparungen nur schwer quantifizierbar, es gibt zurzeit kein einheitliches Vergütungsschema.

Ganzheitliche Betrachtung der Wertschöpfungskette von Batterien

Um das Potenzial von Batterielösungen in seinem vollen Umfang zu entfalten, bedarf es einer integrierten Betrachtung der endogenen und exogenen Faktoren. Das Bayerische Zentrum für Batterietechnik (BayBatt) bündelt die notwendigen Kompetenzen an der Universität Bayreuth und adressiert mit seiner Forschung die komplette Wertschöpfungskette von Batterien. So wird einerseits an neuen Materialkombinationen und Fertigungsverfahren geforscht, die unter anderem die Zyklenfestigkeit, die Effizienz und die Skalierbarkeit der Produktion verbessern werden; andererseits werden neue Anwendungslösungen erarbeitet, die beispielsweise durch selbstlernende Batterie- und Energiemanagementsysteme die Ökonomie verbessern. Zudem werden Haushaltsspeicher, die im „Schwarm“ miteinander vernetzt sind, evaluiert. Weitere Themen von Forschung und Entwicklung im BayBatt sind sektorübergreifende Konzepte, wie zum Beispiel die aktive Integration von E-Autos in das Stromnetz (Vehicle-to-Grid) sowie die stationäre Weiternutzung ausgemusterter Elektroautobatterien (Second-Life-Battery-Storage).

Wirtschaftsinformatik als wertschöpfende Schnittstelle zwischen Markt und Technologie

Die Wirtschaftsinformatik verknüpft die marktliche Betrachtung mit technologischen Aspekten und trägt dadurch zur interdisziplinären Forschung im Rahmen des BayBatt entscheidend bei. Das Forschungsteam für Wirtschaftsinformatik und Nachhaltiges IT-Management in Bayreuth legt dabei seine Schwerpunkte auf datengetriebene Modelle, die digitale Vernetzung von Batterien und die Analyse

der Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichern mit verschiedenen Anwendungsprofilen.

Damit der Batteriebetrieb in ökonomischer Hinsicht optimiert werden kann, sind vielfältige Faktoren relevant und letztlich entscheidend:

- die Modellierung des Batteriespeichers,
- die Berücksichtigung technischer Restriktionen wie Leistungsgrenzen, Alterung, Ladezustand,
- die Abstrahierung der technisch komplexen Charakteristika des Batteriespeichers,
- die Beachtung der durch „Stacking“ entstehenden Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Anwendungsfällen
- sowie der Einbezug individueller Anwendungsmuster, zum Beispiele von Haushalten und industriellen Lastkurven.

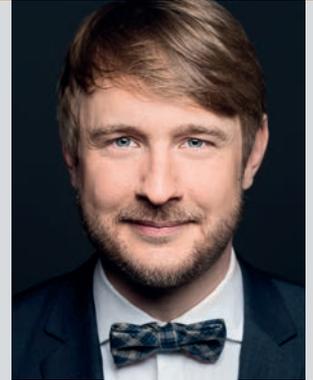
Das Bayreuther Forschungsteam richtet den Fokus nicht allein auf die intelligente Modellierung einzelner Speicher, sondern auch auf die Steuerung und Koordination einer großen Anzahl von Batteriespeichern in einem Schwarm. Interessante technische und wirtschaftliche Perspektiven bieten in diesem Zusammenhang sogenannte virtuelle Batterien, die aus einem Quartierspeicher, dezentralen PV-Heimspeichern und mobilen Speichern in Elektroautos bestehen. Die zentrale Steuerung dieser virtuellen Systeme kann einen entscheidenden Beitrag zur Versorgungssicherheit des Stromsystems leisten.

„Eine Entwicklung, die Batterien zu einer Schlüsseltechnologie im 21. Jahrhundert macht.“

Fazit

Das Bayerische Zentrum für Batterietechnik bringt Forschungsexpertise rund um Batteriespeicher in einem multi- und interdisziplinären Verbund auf dem Campus der Universität Bayreuth zusammen. Es adressiert in engem Austausch mit der Industrie die aufkommenden technologischen und marktlichen Herausforderungen, um die Technologie und Ökonomie von Speichersystemen weiter zu verbessern und dadurch die Integration von erneuerbaren Energien weiter voranzutreiben.

AUTOREN



■ Prof. Dr. Gilbert Fridgen ist Professor für Wirtschaftsinformatik und Nachhaltiges IT-Management an der Universität Bayreuth und stellvertretender Leiter der Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik (FIT) sowie stellvertretender wissenschaftlicher Leiter des Kernkompetenzzentrums Finanz- & Informationsmanagement.



■ Leon Haupt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsteam für Wirtschaftsinformatik und Nachhaltiges IT-Management an der Universität Bayreuth.