

# Stromspeicher im Energiesystem der Zukunft

In einem Energiesystem, das zunehmend durch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien dominiert wird, müssen zur Wahrung der Versorgungssicherheit und der Versorgungsqualität neue Wege beschritten werden. Die Aufgaben zur Sicherstellung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung sind neu zu verteilen.

Zu den Aufgaben für Netzstabilisierung und Aufrechterhaltung der Stromqualität zählen

- Blindleistungsbereitstellung
- Phasensymmetrisierung
- Flickerkompensation
- Spannungshaltung

Für die Übernahme dieser Aufgaben sind Technologien gefragt, die diese Fähigkeiten haben:

- kurzfristig sehr hohe Leistungen zur Verfügung stellen können
- Lastspitzen ausgleichen mittels load-levelling und peak-shaving .
- Regelenergie (Minutenreserve, Primär- und Sekundärregelleistung) bereitstellen
- Im Tagesverlauf müssen kurzfristige Prognoseabweichungen ebenso wie mehrstündige Erzeugungsspitzen oder -flauten ausgeglichen werden können.
- Auch während mehrtägiger Großwetterlagen müssen die Energiebereitstellung sichergestellt und jahreszeitliche Erzeugungsschwankungen in das Energiesystem sinnvoll eingebunden bzw. ausgeglichen werden. Für diese Aufgaben bedarf es Technologien, die große Energiemengen speichern können.

Alle genannten Aufgaben können von unterschiedlichen Stromspeichertechnologien übernommen werden, wobei jede Technologie ihre eigenen Stärken und Schwächen aufweist. Je nach Situation und spezifischer Aufgabenstellung eignen sich verschiedene Technologien oder Kombinationen von Technologien besonders.

Basierend auf den Analysen des Fraunhofer IWES im Rahmen des Forschungsprojekts TF-Energiewende [1] ist zu konstatieren, dass Forschungs- und Entwicklungsstand der einzelnen Stromspeichertechnologien noch sehr verschieden sind, ebenso wie ihre Entwicklungsdynamik, die Entwicklungspotenziale und die Anwendungsfelder. Während Pumpspeicherkraftwerke technologisch ausgereift und im Markt

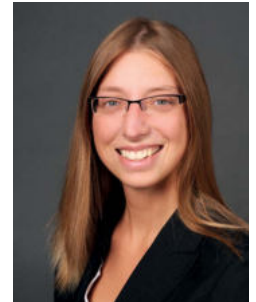
etabliert sind, ihre weitere Verbreitung jedoch an der fehlenden Verfügbarkeit weiterer geeigneter Standorte scheitert, stehen gerade die elektrochemischen Speicher noch am Anfang der Marktdurchdringung und erschließen sich erst sukzessive immer weitere Anwendungsfelder. Daher konzentriert sich im Bereich der Pumpspeicherkraftwerke die Forschung auf Einzelprojekte zur Entwicklung alternativer Ansätze wie das Offshore-Pumpspeicherkraftwerk im Projekt STENSEA des Fraunhofer IWES [3], während im Bereich der elektrochemischen Speichertechnologien die Forschungsaktivitäten sehr breit gestreut sind.

Im Forschungsprojekt „Technologien für die Energiewende“ lag der Fokus auf der Analyse des Entwicklungsstands und der erforderliche Forschungsaktivitäten zur Erschließung der verbleibenden Entwicklungspotenziale der elektrochemischen Speicher [1]. Innerhalb dieses ebenfalls breiten Themenfeldes wurden wiederum diejenigen Technologien vertieft analysiert, die noch über ein entsprechendes Entwicklungspotenzial verfügen. Daher wurden Lithium-basierte und Natrium-basierte Systeme ebenso wie Redox-Flow-Batterien einer vertieften Analyse unterzogen.

## Lithium-basierte Systeme

Unter den verschiedenen Typen der Lithium-basierten Batterien sind die Lithium-Ionen-Batterien die am weitesten entwickelten Systeme, die auch schon in vielen Anwendungsbereichen der Konsumerelektronik (z.B. Laptop, Smartphone, Akkuschauber) kommerziell eingesetzt werden.

Das Funktionsprinzip der Lithium-Ionen-Batterie basiert auf dem Austausch von Lithium zwischen den Aktivmaterialien der Anode und Kathode. Bei der Entladung diffundiert Lithium vom Inneren der Kohlenstoffanode zu deren Oberfläche. An der Grenzfläche zwischen Anode und Elektrolyt wandelt sich das Lithium in ein Lithium-Ion unter Freisetzung eines Elektrons um. Dieses Lithium-Ion wird über den Elektrolyten zur Kathode transportiert. Auf der Kathodenoberfläche wird ein Elektron aufgenommen, um Lithium zu bilden, das schließlich in das Innere der Kathode diffundiert und dort interkaliert. Der Ladevorgang findet vollständig analog in umgekehrter Richtung statt [1].



ZSW

Maïke Schmidt  
maïke.schmidt@zsw-bw.de

DLR

Prof. Dr. Arnulf Latz  
arnulf.latz@dlr.de

Prof. Dr. Andreas Friedrich  
andreas.friedrich@dlr.de

ISE

Dr. Matthias Vetter  
matthias.vetter@ise.fraunhofer.de

ISFH

Matthias Littwin  
littwin@isfh.de

Michael Knoop  
m.knoop@isfh.de

IEE (vorm. IWES)

Matthias Puchta  
matthias.puchta@iee.fraunhofer.de

IZES

Dr. Bodo Groß  
gross@izes.de

FZ Jülich

Prof. Dr. Olivier Guillon  
o.guillon@fz-juelich.de

Prof. Dr. Dina Fattakhova  
d.fattakhova@fz-juelich.de

ZAE Bayern

Petra Dotzauer  
petra.dotzauer@zae-bayern.de

KIT

Prof. Dr. Helmut Ehrenberg  
helmut.ehrenberg@kit.edu

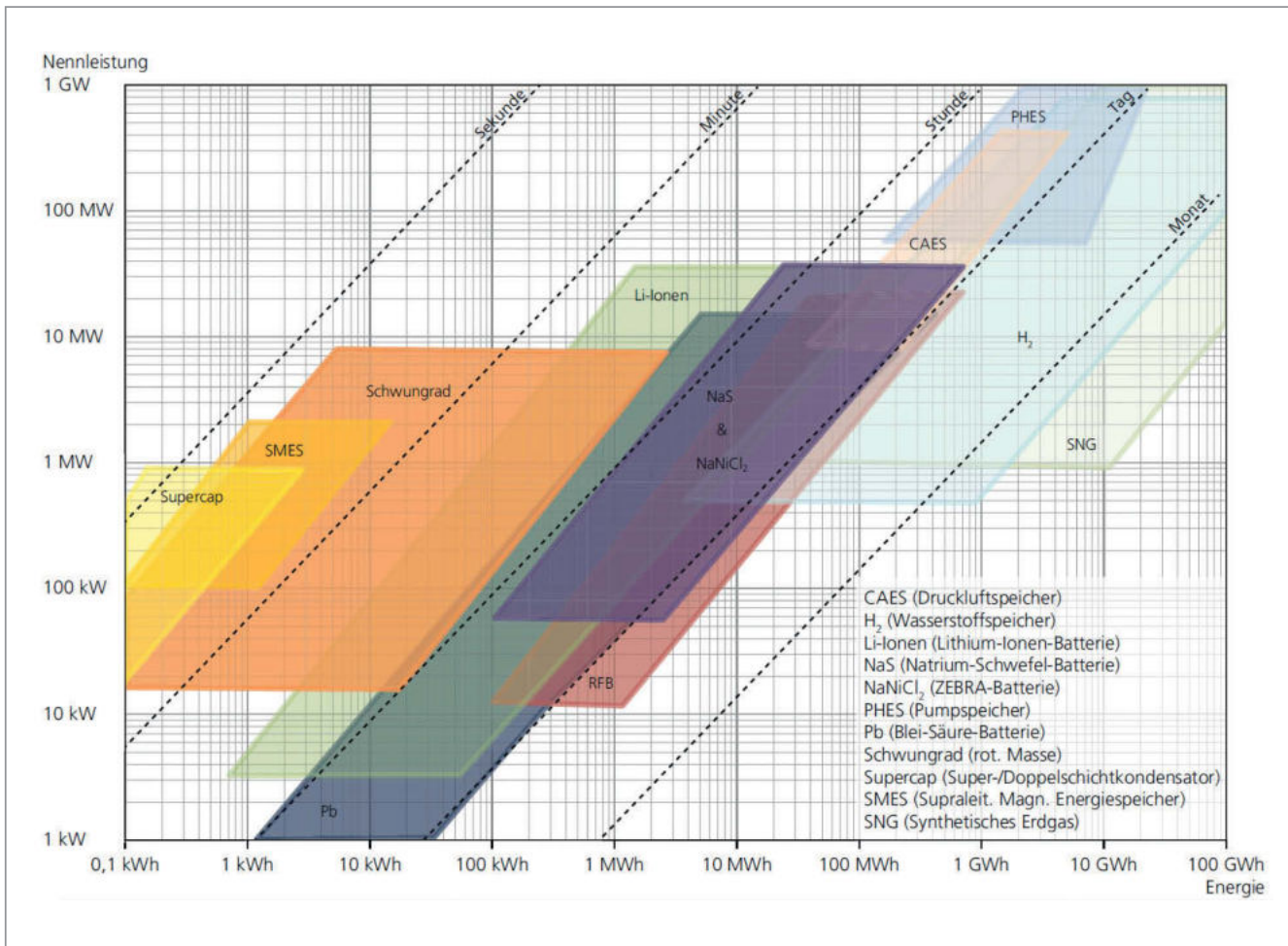


Abbildung 1  
**Klassifizierung elektrochemischer stationärer Energiespeicher nach Energie und Leistung im Vergleich zu anderen Speichertechnologien. [2]**

Die Herausforderung für ihren breiten Einsatz im Energiesystem der Zukunft liegt in der Hochskalierung bei gleichzeitig deutlicher Erhöhung der Energiedichte und der Reduktion der Kosten. Dies gilt sowohl für ihren Einsatz als stationäre Speicher (z. B. PV-Heimspeicher) als auch für den Einsatz in der Elektromobilität.

Auch wenn in den letzten Jahren bereits sehr große Entwicklungsfortschritte erzielt werden konnten, sind die Entwicklungspotenziale dieser Technologie noch lange nicht ausgeschöpft. Sie wird auch von der EU als eine Schlüsseltechnologie betrachtet, weshalb im SET-Plan eigenständige Entwicklungsziele für die Lithium-Ionen-Batterie für das Jahr 2030 festgelegt wurden [4]. Diese beinhalten unter anderem eine Verdopplung der gravimetrischen Energiedichte von 85–135 Wh/kg auf > 250 Wh/kg, eine Reduktion der Ladezeit von 30 auf 3 Minuten, eine Verdopplung der Lebensdauer, bis zu einer Verzehnfachung der Zyklenzahl in der stationären Anwendung (Zielwert: 10.000 Zyklen) sowie eine Reduktion der Kosten für Batteriepacks für die mobile Anwendung von heute

180–285 €/kWh auf 75 €/kWh. Entsprechend intensiv sind die nationalen und internationalen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Die Lithium-Ionen-Batterien befinden sich schon in der Kommerzialisierungsphase, so dass auch für Neuentwicklungen mit einem Markteintritt bis 2020 gerechnet werden kann.

Auch an den nächsten Generationen der Lithium-basierten Systeme wird bereits intensiv entwickelt, wobei von einer Kommerzialisierung bei Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Systemen erst bis 2030 auszugehen ist. Für Post-Lithium-Ionen Batterien, die Lithium in metallischer Form beinhalten, wird von der Kommerzialisierung erst bis 2040 ausgegangen [1]. Sie können jedoch nach heutigem Kenntnisstand vor allem die erwarteten Sprünge in der Energiedichte liefern.

Batterien, die Lithium in metallischer Form als Anode verwenden, funktionieren jedoch grundsätzlich anders als Lithium-Ionen-Batterien, denn die Kathode kann beispielsweise eine Gasdiffusionselektrode (Li/

Luft) oder schwefelhaltige Graphitstruktur sein (Li/S). Aufgrund des metallischen Lithiums ist der potenzielle Energiegehalt dieser Technologien wesentlich höher als bei den Lithium-Ionen-Batterien. Dies ist der Grund für die vielfältigen F&E-Tätigkeiten im Bereich der Post-Lithium-Ionen-Batterien, die überwiegend die Leistungsfähigkeit und Stabilität der Technologien adressieren [1].

## Natrium-basierte Systeme

Ein weiterer wichtiger betrachteter Technologiebereich sind die Natrium-basierten Systeme. Hierbei handelt es sich um Hochtemperaturbatterien. Es dominieren Natrium-Schwefel- und Natrium-Nickel-Chlorid-Systeme. Bei diesen Systemen spielen der Elektrolyt und der Separator eine wesentliche Rolle in Bezug auf Leistungsdichte, Stabilität und Sicherheit. Natrium-basierte Thermalbatterien erfordern hohe Temperaturen für die Aufrechterhaltung des flüssigen Zustands (Elektroden und/oder Elektrolyt) und die Ionenleitfähigkeit des Separators. So wird der große Vorteil einer vernachlässigbaren Selbstentladung dieser Systeme durch die thermischen Verluste und den Energiebedarf der Heizung des Batteriesystems reduziert. Darüber hinaus ist die wirtschaftliche Anwendbarkeit von Hochtemperaturbatterien meist auf Systeme im großen Maßstab beschränkt, da nur in diesen Fällen die Oberfläche und damit die thermischen Verluste entsprechend minimiert werden können [1].

Die genannten Systeme befinden sich in der Kommerzialisierungsphase, wobei es nur einzelne Anbieter im asiatischen Raum gibt. In Japan wird die Technologie aktuell bereits zur Stabilisierung der Stromversorgung eingesetzt.

Um das in Natrium-basierten Systemen schlummernde Potenzial einer sehr niedrigen Entladungsrate, einer hohen Zyklenzahl, langer Lebensdauer sowie einer relativ einfachen Produktion voll ausschöpfen zu können, müssen Niedertemperatur-Materialien entwickelt werden. Das kostengünstige und hochverfügbare aktive Material, insbesondere im Vergleich zu Lithium, macht diesen Batterietyp zu einem vielversprechenden Kandidaten für eine langfristige Technologie in der stationären Energiespeicherung.

## Redox-Flow-Batterien

Die dritte intensiv betrachtete Technologie ist die Redox-Flow-Batterie (RFB). Ihr Funktionsprinzip entspricht dem wiederaufladbarer Brennstoffzellen. Ein großer Vorteil der Redox-Flow-Batterie gegenüber herkömmlichen Batteriesystemen, ist die Trennung von Leistung (Wahl der Fläche und Anzahl der Stacks) und Energie (Wahl des Elektrolyten und der Größe des Tanks mit skalierbarem Volumen), also Reaktionsort und Lagerung. Auf diese Weise kann eine Erhöhung des Volumens und damit der gespeicherten Energie auf einfache und kostengünstige Weise erfolgen, so dass auch größere Energiemengen stationär gespeichert werden können.

Da in der Redox-Flow-Batterie die aktiven Materialien in den Elektrolyten aufgelöst werden und der Elektronentransfer zwischen der gelösten aktiven Spezies und der festen Elektrode stattfindet, finden keine (De-)Interkalations- und Festkörper-Diffusionsprozesse statt (ähnlich Brennstoffzellen), was die Elektrodendegradation minimiert.

Darüber hinaus bieten Redox-Flow-Batterien ein schnelles Ansprechverhalten sowie breite Leistungs- und Entladezeitbereiche (breiter Anwendungsbereich), geringe Selbstentladungsraten durch die Lagerung in externen Tanks und ein hohes Maß an Sicherheit durch die durchflussgesteuerte Reaktion. Dennoch machen ihre geringe Leistungsdichte und ihre Energiedichte sie für mobile Anwendungen ungeeignet [1].

Trotz großer Forschungsaktivitäten in allen genannten Bereichen (► [Abbildung 2](#)) ist die deutsche Industrie in den verschiedenen Technologiesegmenten sehr unterschiedlich aufgestellt. Im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien sind die asiatischen Hersteller momentan führend und die deutsche Industrie nach der im Projekt „Technologien für die Energiewende“ vorgenommenen Klassifizierung nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig. Hier arbeiten gerade neben anderen Forschungseinrichtungen verschiedene Mitgliedsinstitute des FVEE – das Fraunhofer ISE, das Forschungszentrum Jülich und das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg – intensiv daran, durch den Transfer neuer Forschungsergebnisse in die praktische Umsetzung die deutsche Industrie international wettbewerbsfähiger zu machen. Angesichts des erwarteten weltweiten Marktvolumens für die Technologie von mindestens 43 Mrd. US-Dollar im Jahr 2020 erscheinen diese Forschungsaktivitäten industriepolitisch nicht nur sinnvoll sondern zwingend [6]. Nicht zuletzt aus diesem Grund sollte die Forschung im Bereich der elektrochemischen Speicher weiter forciert werden. Auch im Bereich der

natriumbasierten Systeme ist die deutsche Industrie nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig, wobei der Markt hier auch ein deutlich geringeres Volumen aufweist. Im Bereich der Vanadium-Redox-Flow-Batterien ist die deutsche Industrie dagegen wettbewerbsfähig. Auch hier unterstützen FVEE-Mitgliedsinstitute wie das ZAE Bayern die Industrie durch ihr Know-how aus Forschungsprojekten.

Im letztgenannten Fall handelt es sich um bereits produzierte Ersatz-Batterien für einen bestimmten Fahrzeugtyp [7]. Um die Batterien bis zu ihrem Einsatz im Fahrzeug möglichst „gesund“ zu erhalten, werden diese in einem stationären Speicher für die Bereitstellung von Primärregelleistung kontrolliert be- und entladen.

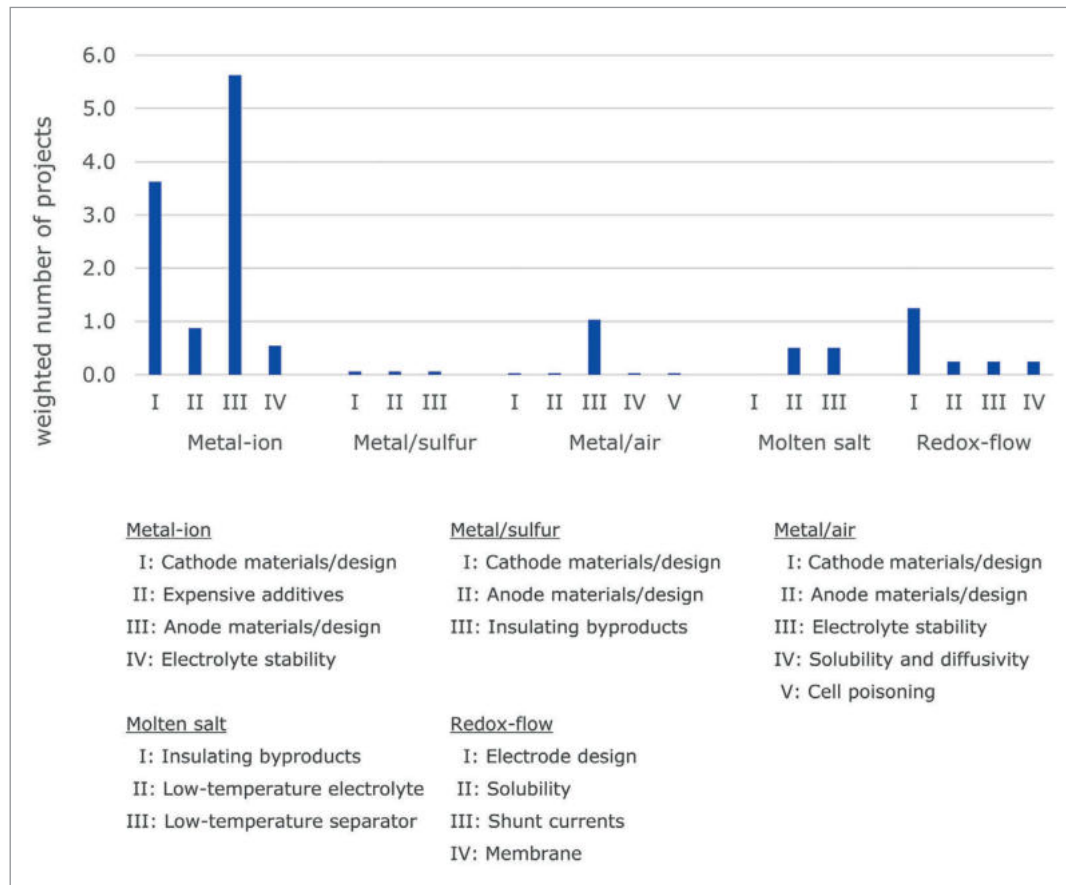
### Materialforschung und Recycling

Angesichts des weltweit wachsenden Marktvolumens und des damit verbundenen Ressourcenverbrauchs nehmen auch die Entwicklung von alternativen Materialzusammensetzungen und Recyclingmethoden an Bedeutung zu. Hierzu zählt auch die Entwicklung von Second-Life-Konzepten für die weitere Nutzung von Batterien aus Elektrofahrzeugen in stationären Systemen. Erste Pilotprojekte nutzen Batterien für mobile Anwendungen in stationären Großbatterien zur Regenergiebereitstellung, entweder nachdem sie bereits im Fahrzeug eingesetzt wurden und hier durch Alterungseffekte eine bestimmte Kapazitätsgrenze (z. B. 80 %) unterschritten haben oder bevor sie überhaupt im Fahrzeug eingesetzt werden.

### Rolle im Energiesystem

Dies zeigt eines der vielseitigen Anwendungsfelder elektrochemischer Speicher im Energiesystem der Zukunft. Sie sind absolut systemkompatibel und können auf nahezu allen Spannungsebenen des heutigen Energiesystems eingesetzt werden. Sie können Lastausgleich und Frequenzregelung ebenso übernehmen wie die Spitzenlastreduktion und die Integration der erneuerbaren Energien. Dabei sind sie nicht auf zusätzliche Infrastrukturen angewiesen, sondern sind mit den bestehenden Infrastrukturen kompatibel und können in vielen Fällen sogar eine optimale Ausnutzung der bestehenden Infrastrukturen unterstützen und den Ausbau von Infrastrukturen vermeiden. Auch in diesem Bereich sind die Mitgliedsinstitute des FVEE aktiv.

Abbildung 2  
Verteilung der Projekte auf die Kernherausforderungen auf der Materialebene.[5]



Das Fraunhofer ISE wertet Ergebnisse aus dem Pilotprojekt Quartierspeicher Weinsberg aus und das ISFH hat einen Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme entwickelt, um eine zielorientierte Marktdurchdringung von Speichersystemen zu unterstützen. Elektrochemische Speicher werden zweifelsfrei eine wichtige Rolle als Flexibilitätsoption und Energielieferant im Energiesystem der Zukunft spielen.

## Quellennachweis

- [1] Rohrig et al; Technologiebericht TF 3.3 Elektrochemische Energiespeicher innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende; 2017
- [2] Thielmann, Axel; Sauer, Andreas; Schnell, Mario; Isenmann, Ralf; Wietschel, Martin (2015): Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.
- [3] Projekt STENSEA gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; FKZ: 0325584B
- [4] European Commission: Towards an Integrated SET-Plan: Accelerating the European Energy System Transformation – Become competitive in the global battery sector to drive e-mobility forward, ISSUES PAPER No 7.2016.05.10. Website: <https://setis.ec.europa.eu/>
- [5] Schledde, Dominik; Dabrowski, Tatjana; Puchta, Matthias; Munzel, Benjamin; Husy, Charlotte; Lipphardt, Marvin; Hartmann; Lena (2016): Support to R&D Strategy for battery based energy storage – Technical analysis of ongoing projects (D5). Ecofys 2016 by order of: European Commission Directorate General Energy. Website: [www.batstorm-project.eu](http://www.batstorm-project.eu)
- [6] DOE Global Energy Storage Database, Abruf am 16.08.2017, Website: [http://www.energy-storageexchange.org/projects/data\\_visualization](http://www.energy-storageexchange.org/projects/data_visualization)
- [7] Pressemeldung der Daimler AG, 13.09.2016; abrufbar unter: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Weltweit-groesster-2nd-Use-Batteriespeicher-geht-ans-Netz.xhtml?oid=13634457>