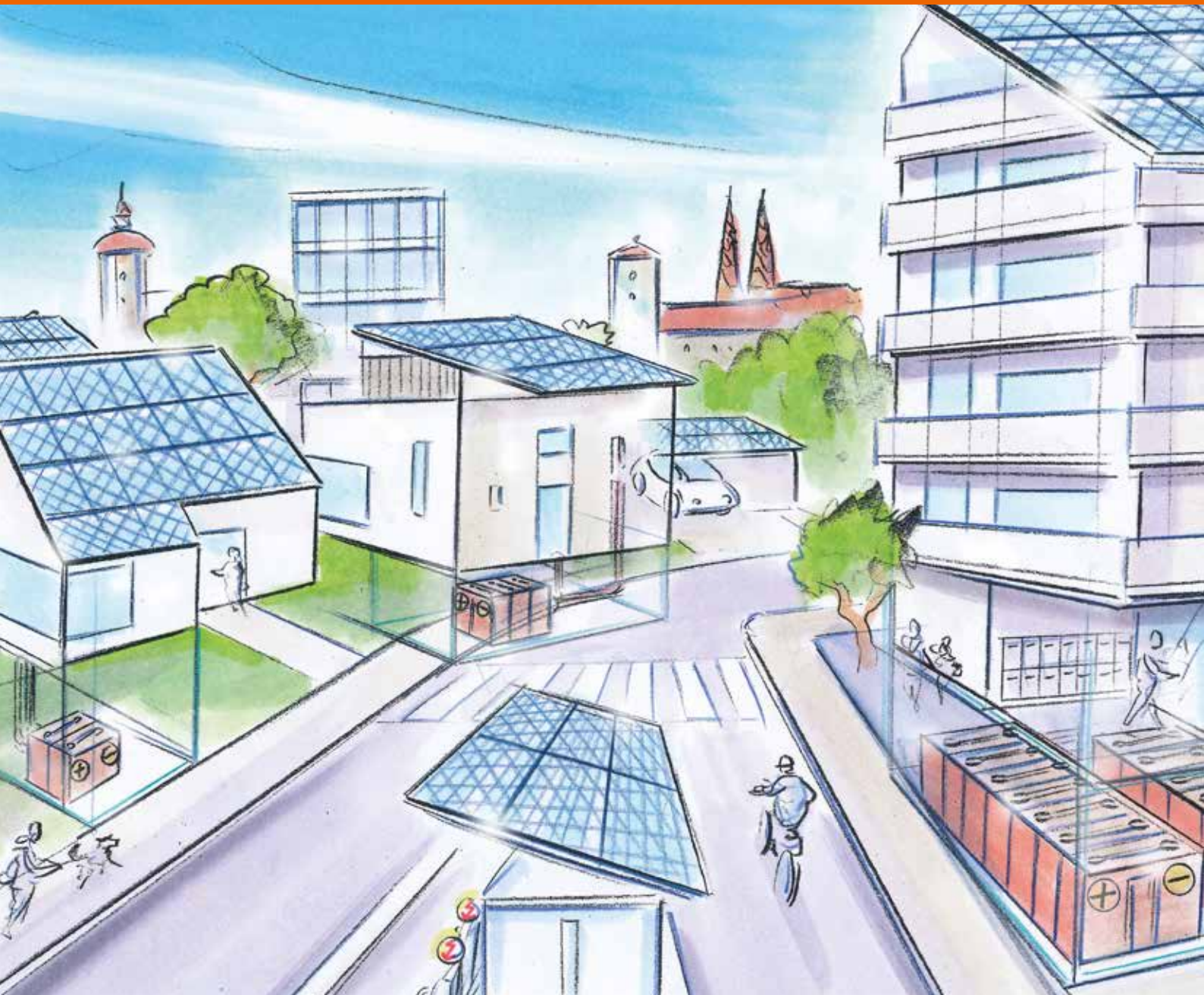


TECHNOLOGIE-ROADMAP STATIONÄRE ENERGIESPEICHER 2030



VORWORT



Deutschland hat sich ambitionierte klimapolitische Ziele gesetzt: Bis zum Jahr 2050 sollen die jährlichen Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 sinken, und schon bis zum Jahr 2020 sollen es mindestens 40 Prozent weniger sein. Den Schlüssel zu diesen Klimaschutzziele stellt die Energiewende dar, eine grundlegende wie historische Umstellung der Energieversorgung in Deutschland. Basierte sie bis dato vor allem auf der Verbrennung von fossilen Endenergieträgern wie Kohle, Gas und Öl sowie der Kernenergie, hielten die Erneuerbaren Energien aus Wind- und Sonnenenergie sowie Biomasse bereits Einzug und erobern immer größere Anteile an der Bruttoenergieerzeugung. Herausforderungen entstehen überall dort, wo die Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie Fluktuationen unterliegt, z. B. angesichts der Tages- oder Jahreszeit und aktueller Wetterbedingungen. Dazu kommt der geographische Faktor, der Windkraft im großen Maßstab im Norden Deutschlands profitabel macht, obwohl die größten Industriebetriebe wiederum ihre Produktionsstandorte im Süden lokalisiert haben. Im Falle des Einsatzes von Biomasse oder Solarenergie spielt auch eine Rolle, dass die eher regionalen Erzeugungskapazitäten häufig nicht direkt bei den eher städtischen Verbrauchsschwerpunkten zu finden sind und deshalb die Themen Stromnetzausbau sowie dezentrale Energieerzeugung und -speicherung zunehmend wichtig werden. Stationäre dezentrale Energiespeicher werden vor dem Hintergrund der Autarkie, für Netzdienstleistungen und Integration Erneuerbarer Energien wie z. B. zur Zwischenspeicherung fluktuierender Wind- und Sonnenenergie eine zunehmend wichtige Rolle spielen.

Die nun vorliegende „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI, welche unter Einbezug nationaler Experten aus Forschung und Industrie in den Bereichen stationärer Energiespeichertechnologien und -anwendungen erstellt wurde, differenziert unterschiedliche Speichergößenklassen und typische Lade- und Entladezeiten und dokumentiert für diese, welche wesentlichen Technologieentwicklungen sich bis 2030 abzeichnen. Hinsichtlich ihrer Eigenschaften werden mit der Blei-Säure-Batterie als Referenztechnologie, Lithium-Ionen- und Redox-Flow-Batterien drei Batterietechnologien zu drei verschiedenen Zeitpunkten (aktuell, kurzfristig und mittel-/langfristig) bewertet.

Stationäre elektrochemische Energiespeicher stehen gerade in den größeren Speicherklassen noch ganz am Anfang ihrer Marktdiffusion, weshalb noch nicht abzusehen ist, wie stark sich welche Batterietechnologie durchsetzen kann. Entwicklungen der Elektromobilität sind dabei Treiber für die Lithium-Ionen-Batterieentwicklung. Diese können wiederum als Konkurrenztechnologie zu Blei-Batterien und Redox-Flow-Batterien als Treiber für offene Entwicklungs- und Kostensenkungspotenziale wirken. So könnten bis 2030 Lithium-Ionen-Batteriezellen konkurrierende Energiespeicherlösungen in zahlreichen Anwendungen darstellen und weite Verbreitung nicht nur in der Elektromobilität, sondern auch im stationären Energiespeicher-Bereich erfahren. Dennoch zeigt die Roadmap, dass auch langfristig ein breites Technologieportfolio erhalten bleibt, mit vermutlich ausgewählten Technologielösungen für spezifische Anwendungen. Welche Technologien zu diesem Portfolio gehören werden bleibt offen, denn auch Systeme wie Na-Ionen Batterien, welche bei besserer Verfügbarkeit der Materialien wesentlich preiswerter als Li-Ionen Systeme werden könnten, dürften zukünftig attraktive Lösungen darstellen. Eine Aktualisierung der Roadmap gemeinsam mit den technischen Entwicklungen wird daher künftig wichtig sein.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen
Technische Universität München
Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik

EINLEITUNG

TECHNOLOGIE-ROADMAP STATIONÄRE ENERGIESPEICHER

Die vorliegende „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ betrachtet ausgehend von dem heutigen Technologieportfolio für stationäre Energiespeicherlösungen deren Entwicklungspotenziale bis 2030. Dabei werden zunächst Referenztechnologien in jeweils vier Klassen von Speichergrößen und typischen Lade- und Entladezeiten eingeteilt. Die Roadmap differenziert Entwicklungspfade für mehrere Speicherklassen, die für Lithium-Ionen-Batterien (LIB) charakteristisch sind, und vergleicht sie mit Konkurrenztechnologien.

Zum einen vertieft die Roadmap die „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“, in welcher der Fokus auf der Entwicklung der Zellkomponenten, Zelltypen und Zelleigenschaften von LIB und ihren Verknüpfungen einschließlich des sie umgebenden Technologieumfeldes bis ins Jahr 2030 liegt. Zum anderen ergänzt sie die „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“, welche auf die für elektromobile Anwendungen zentralen Entwicklungen der Hochenergie-LIB (HE-LIB) sowie Brennstoffzellentechnologie fokussiert.

In der „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ steht nun die Nutzung von LIB für stationäre Anwendungen im Vordergrund. Diese werden jedoch im Kontext konkurrierender, alternativer bzw. bereits etablierter stationärer Energiespeichertechnologien betrachtet. Relevante Entwicklungen werden im gesamten Technologiefeld im Zeitraum zwischen 2015 und 2030 entsprechend ihrer potenziellen Marktreife/ihrem Markteintritt verortet, und es werden die besonders viel versprechenden Trends ausgewählt und bewertet.

VORGEHEN UND METHODIK

Der Erstellung aller Roadmaps liegt ein methodisch gestütztes Vorgehensmodell zugrunde. Hierbei werden qualitative und quantitative Forschungsmethoden kombiniert. Ebenso erfolgt jeweils (soweit möglich) ein Abgleich der nationalen (bzw. teilweise EU-) Perspektive der Roadmap mit internationalen Entwicklungen, wodurch das Roadmapping durch ein Monitoring ergänzt und gestützt wird. Das Vorgehen folgt den in der Abbildung angedeuteten vier Schritten: In einem ersten Schritt wird auf Basis von Desk-Recherchen und Studienanalysen ein Rahmen für einen Zukunftsentwurf methodisch vorbereitet, welcher



die Roadmap-Architektur darstellt und in Expertenworkshops (mit typischerweise 10 bis 20 für den Abdeckungsbereich der Roadmap einschlägigen Experten aus Wissenschaft und Industrie) inhaltlich erarbeitet wird. Hierdurch wird eine interaktive Diskussion und Konsensbildung ermöglicht. Vertiefende Expertengespräche gehen der Roadmap-Entwicklung teilweise voraus oder werden bei offenen Fragen im Nachgang geführt. In einem zweiten Schritt wird die Roadmap erstellt und visualisiert. Handlungsoptionen können schließlich akteursspezifisch abgeleitet werden. In einem dritten Schritt folgt eine Analyse und Konsistenzprüfung (z. B. durch Publikations-, Patentanalysen, Technologie- und Marktstudien etc.) sowie ggf. eigene Modellberechnungen, um die Aussagen der Roadmap über eine Szenarienbildung quer zu prüfen bzw. neben der qualitativen Experteneinschätzung auch quantitativ abzustützen und möglichst zu bestätigen. In einem vierten Schritt erfolgt schließlich der Abgleich realer/aktueller Entwicklungen (z. B. erreichte Leistungsparameter, Beobachtung der Marktentwicklung) mit den aus der Roadmap abgeleiteten Handlungsoptionen. Die Verknüpfung mit dem (internationalen) Monitoring ist wichtig, um für Deutschland bzw. akteursspezifisch zugeschnittene Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen ableiten zu können.

KERNAUSSAGEN

Im Gegensatz zu (elektro-)mobilen ist bei stationären Energiespeichern eine deutlich größere Breite relevanter Speicherklassen zu unterscheiden, welche von kleinen (z. B. dezentralen) Energiespeichern unterhalb 10 kWh bis zu sehr großen (und zentralen) Energiespeichern jenseits 1 GWh reichen können.

Da sich zudem die spezifischen Anforderungen an stationäre Energiespeicher je nach Anwendungsfall und Nutzungsbereich deutlich von denen an Energiespeicher für elektromobile Anwendungen unterscheiden, müssen auch die Schwerpunkte in der Bewertung ihrer Eigenschaften anders gesetzt werden.

Hinsichtlich ihrer Eigenschaften werden mit der Blei-Säure-Batterie (Pb) als Referenz, Lithium-basierten und Redox-Flow-Batterien (RFB) drei Technologien zu drei verschiedenen Zeitpunkten (aktuell, kurzfristig und mittel-/langfristig) bewertet. Gerade im Bereich kleinerer Speichergrößen ist die Konkurrenz groß und insbesondere LIB (hohe Energie bzw. hohe Leistung) bilden heute selbst den Stand der Technik ab. Auch RFB mit unabhängig voneinander skalierbarer Leistungs- oder Speichereinheit stellen bei größeren Speicherklassen eine Alternative dar. Weiterhin zu beobachtende Trends umfassen die Entwicklung der nächsten Generation von Superkondensatoren, einer neuen Generation von Natrium-basierten Niedrigtemperatur-Systemen (mittelfristig) und die Entwicklung von Energiespeichern für Wasserstoff oder synthetisches Erdgas.

Neben der langfristig attraktiven Entwicklung von „Post-LIB“, wie z. B. der Lithium-Schwefel (Li-S)- oder Metall-Luft-Batterien, lassen sich für die optimierte LIB im Wesentlichen zwei Entwicklungspfade feststellen:

Etablierte und bereits günstige Systeme mit Lithium-Eisenphosphat (LFP)-Kathode und Graphit-Anode sind durch Verwendung von Lithium-Titanat (LTO)-Anoden für Anwendungen mit hohen Anforderungen an Lebensdauer und Zyklen attraktiv und weisen ein hohes Marktdiffusionspotenzial auf. Jedoch werden auch weiterhin LFP/Graphit-Systeme zum festen Portfolio an elektrochemischen Speichern für stationäre Anwendungen zählen. Mit dem fortlaufenden Trend zur Kostenreduktion (sowohl bei Investitionen als auch der Betriebskosten) und Verbesserung der Wirtschaftlichkeit auf Basis von Lebenszyklus- bzw. Levelized Cost of Electricity (LCOE)-Betrachtungen hat die LIB die Möglichkeit der zunehmenden Diffusion und Ausbreitung auch in höheren Speicherklassen.

Als zweiter Entwicklungspfad ist die zu erwartende Verfügbarkeit ganz wesentlich in den Kosten reduzierter Hochenergie-Batterien (HE-NMC oder -NCA), getrieben durch die Entwicklungen in der Elektromobilität, zu sehen. Mit Zellkosten zwischen 100–200 €/kWh zwischen 2020 und 2030 (ggf. sogar vor 2030 bereits darunter) können in diesem Zeitraum attraktive Märkte für diese (heute noch gegenüber der Pb- oder LFP-Batterien vergleichsweise teuren) Zellchemie entstehen. Jenseits 2030 könnten (HE-)LIB-Zellen mit 50–100 €/kWh konkurrierende Energiespeicherlösungen in zahlreichen Anwendungen werden und eine breite Diffusion neben dem elektromobilen dann auch im stationären Einsatzbereich einleiten.

Das Portfolio an Energiespeichertechnologien ist durchaus diversifiziert und existierende sowie neue Technologien mit hohem Entwicklungspotenzial weisen unterschiedliche Vorteile je nach Speicherklasse und Anwendungszweck auf. Die für den deutschen Standort attraktiven langfristigen Technologieentwicklungen (insbesondere in Hinblick auf die Energiewende) sollten daher technologieneutral unterstützt werden.

Dezentralen (elektrochemischen) Speichern kommt aber bei einem Ausbau der fluktuierenden Erneuerbaren Energien eine besondere Bedeutung zu und Lithium-basierte Energiespeicher weisen noch ein enormes technisches sowie Kostenreduktions-Potenzial auf. Sie könnten beginnend zwischen 2020 und 2030 nicht nur innerhalb elektrochemischer oder stationärer Energiespeicher an sich, sondern auch bzgl. anderer Flexibilisierungsoptionen konkurrenzfähig werden. Die in der Roadmap skizzierten aussichtsreichen Entwicklungen sollten daher sowohl technisch und anwendungsseitig differenziert vorangetrieben und auf die marktnahen Hauptentwicklungen fokussiert werden.

ENERGIESPEICHER-PORTFOLIO FÜR STATIONÄRE ANWENDUNGEN

Das breite Portfolio stationärer Energiespeichertechnologien wird typischerweise anhand der Energiespeichergröße (in Wh) und -leistung (in W) sowie der typischen Lade-/Entladedauer (in Zeit) klassifiziert. Für stationäre Energiespeicher ist eine große Breite relevanter Speichergrößenklassen zu unterscheiden, welche von kleinen (z. B. dezentralen) Energiespeichern unterhalb 10 kWh bis zu sehr großen (und zentralen) Energiespeichern jenseits 1 GWh reichen können. Darüber hinaus sind sie nach ihrer Lade-/Entladedauer z. B. im Stunden-Bereich als Pufferlösungen (für den Stand-by-Betrieb) bis hin zu Langzeitspeichern weit jenseits von einer Woche zu unterscheiden (siehe Abbildung¹).

Ausgehend von dieser Klassifizierung werden in dieser Roadmap jeweils vier Speichergrößen (<100 kWh, 100 kWh–1 MWh, 1 MWh–1 GWh, >1 GWh) sowie Lade-/Entladedauern (<1 Std., 1 Std.–1 Tag, 1 Tag–1 Woche, Langzeit) unterschieden, sodass sich 16 Bereiche für eine konkretere Bewertung ergeben (siehe Tabellen auf der nächsten Doppelseite). Die Bewertung erfolgt nach den folgenden Kriterien:

1. Wie relevant ist die Nutzung/Anwendung von stationären Energiespeichern in dem gegebenen Bereich von Speichergrößen- und Lade-/Entladezeit einzustufen? (Die Einschätzung der Relevanz erfolgt wie folgt: ++ (sehr relevant), + (relevant), 0 (neutral, unter gewissen Umständen relevant), – (nicht relevant). Die neutrale Bewertung ist in der Regel an Bedingungen geknüpft, wie z. B. die Abhängigkeit von lokalen bzw. regionalen Faktoren, da stets die wirtschaftliche Nutzbarkeit alternativer Energiequellen und -speicher in einer gegebenen Region zu berücksichtigen ist. Die Bedeutung eines stationären Speichers kann somit z. B. regional unterschiedlich ausfallen.)
2. Wie relevant ist die Nutzung/Anwendung von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) als stationäre Energiespeicher? (Die Einschätzung der Relevanz erfolgt wie zuvor erläutert.)
3. Welches ist/sind die heutige/n Referenztechnologie/n, mit welcher/n LIB konkurrieren würden?
4. Welches ist/sind das/die relevante/n Anwendungsfeld/er und Geschäftsmodell/e?

Bei den Energiespeichern mit Lade-/Entladedauern von weniger als 1 Stunde handelt es sich um sogenannte Leistungsspeicher, welche ihre jeweilige Energiemenge in einem sehr kurzen Zeitraum abgeben und aufnehmen (z. B. für die Notstromversorgung oder Netzdienstleistungen). Darüber hinaus könnte nach Kurzzeitspeichern im Minuten- und Sekundenbereich differenziert werden, was zwecks Übersichtlichkeit in dieser Roadmap aber nicht erfolgt. Energiespeicher mit eintägiger Lade-/Entladedauer dienen z. B. der privaten oder gewerblichen (dezentralen) Eigenbedarfsoptimierung oder dem sogenannten „peak load shifting“, bei dem es darum geht, die flexiblen Stromnetzlaster von Höchstlastzeiten auf Niedriglastzeiten so zu verschieben, dass die Energieerzeugungskapazität bzw. das Stromnetz entlastet und über einen Tag hinweg gleichmäßiger ausgelastet werden. Oberhalb eines Tages bezeichnet man die Energiespeicher als Langzeitspeicher.

Bezogen auf eine Einteilung nach kWh lassen sich Speicher z. B. in der Größenordnung von 5–10 kWh für dezentrale Anwendungen etwa in Häusern einteilen (z. B. Einfamilienhaus) aber auch in größere dezentrale Speicher unterhalb 100 kWh (z. B. sogenannte Quartierspeicher). Energiespeicher im Bereich von 100–500 kWh können für Wirtschaftsgebäude (Gewerbe, Unternehmen) relevant sein und Speicher oberhalb von 500 kWh eignen sich für Insellösungen. Blei-Säure-Batterien (Pb) und LIB gehören hier zu den Referenztechnologien.

Die Versorgung ganzer Häuserzeilen bzw. Siedlungen als Einheit über großformatige Quartierspeicher wird als besonders attraktive (und eine zur Einzelhausversorgung vergleichsweise wirtschaftliche Lösung) eingeschätzt. In Deutschland herrscht ca. 99 Prozent Netzanschluss, international sieht es allerdings ganz anders aus. Deshalb könnten autarke Produkte mit 20, 30 oder 40 kWh v. a. dort für Einzelhäuser verkauft werden, was auch größere Lösungen für Häuserzeilen bzw. Siedlungen anbelangt. Autarke Quartierspeicher basierend auf Sonnenenergie werden heute bereits in Südkorea eingesetzt, um die CO₂-Emissionen zu senken.

Zu großen Energiespeicherklassen hin können z. B. Stadtwerke (im Bereich von 100 kWh bis 1 GWh Speichergöße und von weniger als 1 Stunde bis 1 Tag Lade-/Entladedauer) mit Regelenergieaufkommen umgehen und einzelne Quartierspeicher zusammenschließen. In solchen Ausführungen (großen Speicherklassen) dürften Natrium-Schwefel (NaS)- und Redox-Flow-Batterien (RFB) als Energiespeichertechnologien für den Einsatz als Quartierspeicher sehr interessant werden.

Ganz allgemein ist festzustellen, dass die elektrochemischen Energiespeicher im GWh-Bereich schon rein technisch nicht die notwendigen Lösungen bieten können. Darüber hinaus sind sie bei entsprechender Größe auch wirtschaftlich zunehmend im Nachteil. Hier stellen Pumpspeicher oder Druckluftspeicher Referenztechnologien dar. Ebenso verlieren elektrochemische Speicher (bis 1 MWh) bei der Langzeitspeicherung (von einem Tag bis mehrere Wochen) an Bedeutung. Wenn Off-Grid-Anwendungen mit berücksichtigt werden, dann gibt es allerdings schon heute Mehrtagespeicher mit Pb oder RFB (nicht LIB), welche relativ konkurrenzfähig sind. Natürlich gilt dies nicht für die klassische deutsche netzgekoppelte Anwendung, aber für Inselösungen.

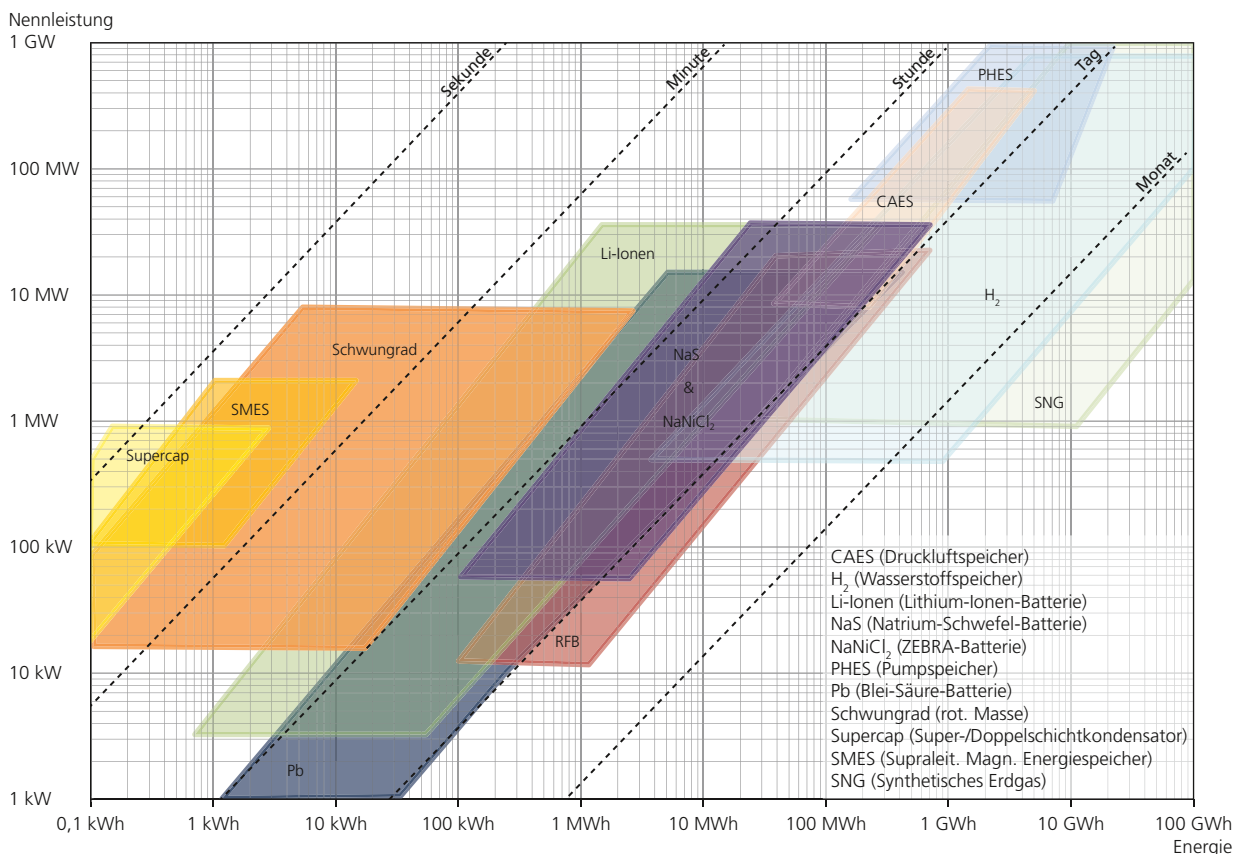
Es zeigt sich eine deutliche Korrelation zwischen Lade-/Entladedauer und den Energiespeichergößen, da Kurzzeitspeicher vornehmlich für „kleinere bis mittlere“ stationäre Anwendungen

(dezentral, nicht-zyklisch/zyklisch) relevant sind und Langzeitspeicher für große bis sehr große Speicher (zentral/zyklisch). Hinsichtlich der Anwendungsbereiche ließen sich daher vereinfacht drei Gruppen unterscheiden:

- Dezentrale kleinere Speicher und Dienstleistungen vor dem Hintergrund der Autarkie
- Energiespeicher zur Integration Erneuerbarer Energien sowie Verteil-/Übertragungsnetzdienstleistungen
- Große zentrale Energiespeicher

Die Roadmap fokussiert auf Deutschland und den deutschen Markt (d. h. Wertschöpfung durch Nutzung in Deutschland und/oder Exportpotenziale). Abgrenzungsschwierigkeiten ergeben sich dennoch z. B. im Falle der saisonalen Wasserspeicher in Norwegen: In diesem Fall existiert durch die Anbindung des skandinavischen Stromnetzes das Risiko, dass die rein energiebezogene Wertschöpfung komplett ins Ausland verlagert wird.

Die in den Tabellen vorgenommene Klassifizierung findet auch in der Roadmap-Architektur Berücksichtigung. Für die Roadmap werden nur die für LIB relevanten Größenklassen und Zyklisierungen (Bewertung ++, + oder 0, nicht -) vertiefend betrachtet. Die Referenztechnologien sowie künftig zu erwartende alternative bzw. konkurrierende Technologien werden für jeden der ausgewählten Bereiche zwischen 2015 und 2030 verortet.



Bedeutung stationärer Energiespeicher

nach Speichergößen und Lade-/Entladezeiten

Speichergröße Lade-/ Entladezeit	< 100 kWh	100 kWh – 1 MWh	1 MWh – 1 GWh	> 1 GWh
< 1 Stunde	+	+ (je nach Markumfang auch ++, nicht DE)	+	0
> 1 Stunde – 1 Tag	++	+ (künftig ++, wenn Kosten niedriger)	+ (künftig ++, wenn Kosten niedriger)	0
> 1 Tag – 1 Woche	0	0	+	+
Langzeit	-	-	0	++

(grün: Relevant, gelb: Neutral, rot: Nicht relevant)

Bedeutung von LIB als stationäre Energiespeicher

nach Speichergößen und Lade-/Entladezeiten

Speichergröße Lade-/ Entladezeit	< 100 kWh	100 kWh – 1 MWh	1 MWh – 1 GWh	> 1 GWh
< 1 Stunde	++	++	+	-
> 1 Stunde – 1 Tag	++	++	+ (künftig ++)	-
> 1 Tag – 1 Woche	0	0	0	-
Langzeit	-	-	-	-

(grün: Relevant, gelb: Neutral, rot: Nicht relevant)

Relevantes Energiespeichertechnologie-Portfolio

nach Speichergößen und Lade-/Entladezeiten

Speichergröße Lade-/Entladezeit	< 100 kWh	100 kWh – 1 MWh	1 MWh – 1 GWh	> 1 GWh
< 1 Stunde	Pb (Stand-by), LIB (zyklisch), Schwungrad, Supercaps (~s)	Pb, LIB (konv.)	Pb, Pumpspeicher, LIB	Nicht definiert
> 1 Stunde – 1 Tag	Pb, LIB, RFB, NaS, NaNiCl ₂	Pb, RFB, NaS, Na-NiCl ₂ , NiMH, (künftig LIB)	Pb, NaS, NaNiCl ₂ , Druckluft- und Pumpspeicher, RFB (MWh), (LIB)	Druckluft- und Pumpspeicher, sais. Wasser- und Gas/H ₂ -Speicher
> 1 Tag – 1 Woche	RFB, NaS, NaNiCl ₂	RFB, NaS, NaNiCl ₂	Pumpspeicher	Sais. Wasser- und Gas/H ₂ -Speicher
Langzeit	Technisch/Wirtschaftlich nicht sinnvoll	Technisch/Wirtschaftlich nicht sinnvoll	Sais. Wasser- und Gas/H ₂ -Speicher	Sais. Wasser- und Gas/H ₂ -Speicher

(grün: In Roadmap betrachtet, grau: Nicht in Roadmap betrachtet)

Anwendungsfelder und Geschäftsmodelle

nach Speichergößen und Lade-/Entladezeiten

Speichergröße Lade-/Entladezeit	< 100 kWh	100 kWh – 1 MWh	1 MWh – 1 GWh	> 1 GWh
< 1 Stunde	Netzdienstl.; Leistungsspitzenpuffer; nicht-zykl. USV, Stand-by, Notstrom (48 V)	Netzdienstl., Peak Shaving/ Peak Load Shifting	Großinsellösungen; z. B. Primär-Regell.	Großes Potenzial international, nicht in DE
> 1 Stunde – 1 Tag	Autarkie, Mikro-Grid, USV mit 10 kWh; <10 kWh (Home Solar), >10 kWh (Quartierspeicher)	Autarkie/Quartierspeicher, EE-Integration, Backup-Lösungen (derzeit v. a. international)	EE-Integration, Insellösungen, Load Shifting	Zentrale Großspeicher (Arbitrage, Schwarzstart etc.)
> 1 Tag – 1 Woche	Off-Grid-Anwendungen, Inselsysteme (bis 3-Tagesspeicher)	Off-Grid-Anwendungen, Inselsysteme (bis 3-Tagesspeicher)	Zentrale. Großspeicher (z. B. Windenergie in Deutschland zur Flautenüberbrückung)	Zentrale Großspeicher
Langzeit	Technisch/Wirtschaftlich nicht sinnvoll	Technisch/Wirtschaftlich nicht sinnvoll	Zentrale Großspeicher	Zentrale Großspeicher

(grün: In Roadmap betrachtet, grau: Nicht in Roadmap betrachtet)

TECHNOLOGIE-ROADMAP STATIONÄRE ENERGIESPEICHER 2030

ZEIT →		2015				KURZFRISTIG								
TECHNOLOGIEN	Speichergröße // Typische Lade- und Entladezeit													
	<100 kWh // <1 h	Pb, LIB, Schwungrad, Supercaps (~sec)	LIB (High power) <1/2 h, >2 C	LIB & BZ (Hybrid)		Optimierte LIB (LFP/LTO)	Next generation Supercaps (auf Li-Basis)							
	(<10 kWh // >1 h – 3 Tage)	Pb, LIB	LIB (High energy) 1-X h, <2 C											
	10 – 100 kWh // >1 h – 3 Tage	Pb, LIB, NaS, RFB, ZEBRA												
	100 kWh – 1MWh // <1 h	Pb, LIB (konv.)				Optimierte LIB (LFP/LTO)	Next generation Supercaps (auf Li-Basis)							
	100 kWh – 1MWh // >1 h – 3 Tage	Pb, RFB, ZEBRA, NiMH, NaS, LIB	LIB (High energy)			H ₂ -Speicher (Druckgasbehälter)								
	1 MWh – 1 GWh // <1 h	Pb, Pumpspeicher	LIB (High energy)					Unkonvent. Pumpspeicher						
	1 MWh – 1 GWh // >1 h – 1 Tag	Pb, NaS, ZEBRA, Pumpspeicher, RFB (MWh)						Druckluftspeicher adiabatisch, mit Wärmespeicher						
	1 MWh – 1 GWh // >1 Tag	Pumpspeicher												
>1 GWh // >1 Tag	Sais. Wasser-/ Gasspeicher													
EIGENSCHAFTEN	Volumetrische... (Stundensp.)	Volumetrische... (Stundensp.)	0	0	+	+	0	0	0	0	++	+	0	0
	Energiedichte (Tagessp.)	Leistungsdichte (Tagessp.)	0	0	+	+	0	0	0	0	++	+	0	0
	Wirkungsgrad	(Stundensp.)	0		++		0		-		++		0	
		(Tagessp.)	0		+		0		-		+		0	
	Zyklische... (Stundensp.)	Kalendarische... (Stundensp.)	0	0	++	+	0	0	++	+	++	++	0	0
	Lebensdauer (Tagessp.)	Lebensdauer (Tagessp.)	0	0	+	+	0	0	++	+	++	++	0	0
	Umgebungsbedingungen (Temperatur)	(Stundensp.)	0		+		0		-		+		0	
		(Tagessp.)	0		+		0		-		+		0	
	Sicherheit	(Stundensp.)	0		0		0		0		0		0	
		(Tagessp.)	0		0		0		0		0		0	
Investitionen (Stundensp.)	Betriebs- (Stundensp.)	0	0	-	+	0	0	(irr)	(irr)	0	+	0	0	
Investitionen (Tagessp.)	Kosten (Tagessp.)	0	0	-	+	0	0	-	-	0	+	0	0	
				Pb (State of the art)		LIB (State of the art) (<100 kWh) 2015		Pb (<100 kWh) 2015		RFB (<100 kWh) 2015		LIB (LFP/LTO) (<1 MWh) 2015+		Pb (<1MWh) 2015+

Zeitraumen

Frage nach verschiedenen Energiespeichertechnologien für den Einsatz in stationären Anwendungen/Produkten und ihren technischen Eigenschaften im Vergleich

Bewertung der Bedeutung einzelner Eigenschaften für die jeweilige Anwendung

(irr) irrelevant
 + besser
 - schlechter
 0 neutral
 ++ viel besser
 -- viel schlechter

ENERGIESPEICHERTECHNOLOGIEN FÜR STATIONÄRE ANWENDUNGEN

Es werden die Referenztechnologien und zukünftig zu erwartende Alternativen bzw. Konkurrenztechnologien in acht Klassen diskutiert:

- <100 kWh // <1 h
- <10 kWh–100 kWh // >1 h–3 Tage
- 100 kWh–1 MWh // <1 h
- 100 kWh–1 MWh // >1 h–3 Tage
- 1 MWh–1 GWh // <1 h
- 1 MWh–1 GWh // >1 h–1 Tag
- 1 MWh–1 GWh // >1 Tag
- >1 GWh // >1 Tag

Die Verortung der Technologien erfolgt zu dem erwarteten Zeitpunkt ihres potenziellen Markteintrittes, also dem Zeitpunkt, zu dem sie kommerziell verfügbar als System bzw. Produkt angeboten werden. Da in der Technologie-Roadmap die Perspektive des Technologieangebots eingenommen und darüber hinaus nicht nach konkreten Anwendungsfällen differenziert wird, muss der angegebene Zeitpunkt nicht notwendigerweise der Zeitpunkt eines tatsächlichen Markteintritts sein. Vielmehr können sich weitere bzw. striktere anwendungsspezifische Anforderungen (insbesondere bzgl. Kosten, Lebensdauer, Sicherheit etc.) ergeben, welche einen Markteintritt noch verzögern oder gar verhindern. Hierzu werden in der „Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ anhand von vier Anwendungsfällen konkrete Technologie-Anwendungsszenarien entwickelt und dargestellt.

Blei-Säure- (Pb) und zunehmend Lithium-Ionen-Batterien (LIB) stellen in den kleinen Energiespeicherklassen Referenztechnologien dar, wobei LIB mit zunehmender Kostenreduktion deutlich an Bedeutung gewinnen und gegenüber der Pb wirtschaftlicher werden. In den großen Energiespeicherklassen stellen Pumpspeicher bis hin zu saisonalen Wasser- und Wasserstoffspeichern Referenztechnologien dar.

Ausgehend von den in der Roadmap in den jeweiligen Klassen angegebenen Referenztechnologien lassen sich je nach Reifegrad der Technologien Weiterentwicklungen für die kommenden 15 Jahre identifizieren.

<100 kWh // <1 h

Als Stand der Technik und Referenztechnologie für Stand-by-Anwendungen gilt die Pb neben der LIB. Superkondensatoren als elektrische und Schwungräder als mechanische Energiespeicher sind für den stationären Betrieb in einem kleinen Markt und zu hohen Kosten schon verfügbar. Zum Beispiel findet Letzteres in der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) der Halbleiterindustrie ihren Einsatz. LIB mit hoher Leistungsdichte (High power, <1/2 h, >2 C) sind kurzfristige Alternativen.

Die Abgrenzung von „High power“ und „High energy“ (für die folgende Klasse mit mehr als 1 Stunde Lade- und Entladezeit) ist für stationäre Energiespeicher wie folgt zu verstehen: „High power“ bezieht sich auf unter einer (halben) Stunde typischer Lade- und Entladezeit (sogenannte „Kurzeitspeicher“). Es gibt auch „Ultra-high power“-Technologien, was den Übergang zu den Supercaps beschreiben würde. „High energy“ bedeutet im Umkehrschluss, dass die typische Lade-/Entladezeit deutlich größer sein darf (von 1 Stunde bis mehrere Tage).

LIB- und Brennstoffzellen (BZ)-Technologien können als hybride Technologien ebenfalls eingesetzt werden. Diese sind verfügbar (technische Umsetzung problemlos) aber noch nicht breit im Markt etabliert (erste Anbieter stellen sich jetzt nach und nach auf). Es handelt sich dabei um die sogenannten „Keller-Kraftwerke“, z. B. als Heizsysteme bis 100 kWh.

Optimierte LIB (speziell das LFP/LTO-System) sind aufgrund der hohen Lebensdauer (kalendarisch und zyklisch) attraktiv.

Next generation Supercaps, also Superkondensatoren der nächsten Generation auf Lithium-Basis und mit höheren Kapazitäten könnten mit viel Optimismus als „Superkurzspeicher“ für die Notstromversorgung nach 2016 zur Verfügung stehen. Kostenbezogen werden sie aber vermutlich erst mittelfristig bzw. ab 2020 wirklich konkurrenzfähig sein, dann aber auch in größeren Anwendungen. Sie bestechen durch die drei- bis vierfache Energiedichte eines normalen Supercaps. Die Kosten pro kWh sind aufgrund der höheren Energiedichte deutlich geringer.

Lithium-Metall-Batterien werden um das Jahr 2020 als marktreif erwartet. Wiederaufladbare Lithium-Luft-Batterien (Li-Luft) gelten weiterhin als langfristig interessante Technologie mit hoher Energiedichte (jenseits 2030), welche sich heute aber noch im Stadium der Grundlagenforschung befindet. Konkretere Aussagen wären daher spekulativ, auch bzgl. des potenziellen Einsatzes in weiteren Energiespeicherklassen.

<100 kWh // >1 h–3 Tage

Auch in diesem Bereich definiert die Pb den Stand der Technik, die LIB wird aber v. a. als dezentraler Photovoltaik (PV)-Energiespeicher in Privathaushalten (<10 kWh) mittlerweile vor der Pb eingesetzt. Redox-Flow-Batterien (RFB) finden Anwendung, wenn längere Ein- bzw. Ausspeicherzeiten gefordert sind. Hochtemperatur-Batterien wie die Natrium-Schwefel (NaS)- als auch die sogenannte ZEBRA-Batterie gehören ebenfalls zum Stand der Technik.

LIB mit hoher Energiedichte (High Energy, 1-Xh, <2 C) gewinnen bereits kurzfristig als zunehmend wirtschaftliche Lösungen an Bedeutung. Eine wiederaufladbare Zink-Luft-Batterie (Zn-Luft) könnte ab 2016/2017 konkurrenzfähig werden, wird aber nicht vor 2020 auf dem Markt erwartet.

Hochenergie (z. B. NMC, NCA)- sowie Hochvolt (>4,4-Volt)-LIB (HE-LIB) sind für stationäre Speicher interessant, sobald sie kostengünstige Alternativen darstellen. Ihre Entwicklung wird sich ganz stark an der Technologieentwicklung für die Elektromobilität orientieren und sie werden daher unter dem Aspekt kostenreduzierter Energiespeicherlösungen ab 2020 zunehmend attraktiv.

Langfristig gilt dies auch für die Lithium-Schwefel-Batterien (Li-S), welche eine spannende (weil sehr kostengünstige) Alternative darstellen können. Erfahrungen liegen mit diesem System in der Praxis aber bisher kaum vor.

Zink-Luft-Batterien (wiederaufladbar) mit einem Kalilaugen-Elektrolyten könnten vermutlich frühestens 2020 als Prototypen auf den Markt kommen. Sollte dies erreicht werden, könnte ihre niedrige Zyklenzahl dennoch gegen einen Einsatz als stationäre Energiespeicher sprechen, für welchen zudem bis dahin eher 20 Jahre kalendarische Lebensdauer gefordert werden. Da diese Anforderungen auch für die wiederaufladbaren Metall-Luft-Batterien (mit Aluminium oder Magnesium) eine große Herausforderung stellen, werden sie ein Thema erst jenseits des Jahres 2030 sein.

100 kWh–1 MWh // <1 h

Die Pb und konventionelle, kostengünstige LIB (LFP/Graphit) stellen den Stand der Technik dar.

Optimierte LIB (LFP/LTO) könnten ab 2015 attraktiver werden. Superkondensatoren der nächsten Generation auf Lithium-Basis könnten auch in dieser Energiespeicherkategorie folgen. Li-S bzw. Sulfid-basierte Batterien werden nach 2020 als kostengünstige Alternative verortet. Die NaS ist in dieser Klasse nicht verortet: Sie könnte zwar schon kurzfristig in Deutschland (sogar zusammen mit der RFB) auf diesen Bereich ausgelegt auf den Markt kommen. Die Batterietechnologie gilt aber noch als zu teuer und es bleibt die Frage, ob sie in diesem Bereich wirtschaftlich werden kann. Li-S und Li-Luft verfügen über keine hohe Leistungsdichte, weshalb sie in andere Speicherklassen einsortiert wurden.

100 kWh–1 MWh // >1 h–3 Tage

Die Pb, LIB, NaS, RFB und ZEBRA-Batterie beschreiben den aktuellen Stand der Technik. Letztere ist bereits verfügbar, wird aber momentan (noch) nicht so gut vermarktet. Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) können ebenfalls auf dem Markt angeboten werden, sind aber gegenüber den anderen technischen Lösungen weniger attraktiv.

LIB mit hoher Energiedichte könnten auch in diesem Bereich künftig über Kostensenkungen noch attraktiver werden.

Die Integration großer Anteile von Erneuerbaren Energien in das konventionelle Energiesystem wird mit der Notwendigkeit Hand in Hand gehen, die operative Flexibilität des Stromnetzes zu erhöhen.² Daraus ergibt sich der Bedarf nach Energiespeicherung für elektrischen Strom, der zu einem bestimmten Zeitpunkt oder an einem bestimmten Ort der Erzeugung nicht benötigt wird oder zur Benutzung in einem anderen Industriesektor transformiert werden muss: Dazu eignen sich die sogenannten Wasserstoff-Speicher hervorragend.

Wasserstoffspeicher stellen eine der drei Hauptkomponenten von Wasserstoffspeicherkraftwerken dar, die aus einem Elektrolyseur, einem Wasserstoffspeicher und einer Rückverstromungseinheit bestehen.³ Elektrische Energie wird dem Stromnetz entnommen und einem Elektrolyseur zugeführt, der Wasser in seine Bestandteile Wasser- und Sauerstoff zerlegt. Der dort produzierte Wasserstoff wird anschließend verdichtet und gespeichert. Zu einem späteren Zeitpunkt kann er dann rückverstromt werden, über Gasturbinenkraftwerke bzw. GuD-Kraftwerke, Gasmotoren oder Brennstoffzellen (BZ).

ZEIT →		2015			KURZFRISTIG	
TECHNOLOGIEN	SpeichergroÙe // Typische Lade- und Entladezeit					
	<100 kWh // <1 h	Pb, LIB, Schwungrad, Supercaps (~sec)	LIB (High power) <1/2 h, >2 C	LIB & BZ (Hybrid)	Optimierte LIB (LFP/LTO)	Next generation Supercaps (auf Li-Basis)
	(<10 kWh // >1 h – 3 Tage)	Pb, LIB	LIB (High energy) 1-X h, <2 C			
	10 – 100 kWh // >1 h – 3 Tage	Pb, LIB, NaS, RFB, ZEBRA		Kostensenkung →		
	100 kWh – 1MWh // <1 h	Pb, LIB (konv.)			Optimierte LIB (LFP/LTO)	Next generation Supercaps (auf Li-Basis)
	100 kWh – 1MWh // >1 h – 3 Tage	Pb, RFB, ZEBRA, NiMH, NaS, LIB	LIB (High energy)		H ₂ -Speicher (Druckgasbehälter)	Hochskalierung →
	1 MWh – 1 GWh // <1 h	Pb, Pumpspeicher	LIB (High energy)			Unkonvent. Pumpspeicher
	1 MWh – 1 GWh // >1 h – 1 Tag	Pb, NaS, ZEBRA, Pumpspeicher, RFB (MWh)				Druckluftspeicher adiabatisch, mit Wärmespeicher
	1 MWh – 1 GWh // >1 Tag	Pumpspeicher				
>1 GWh // >1 Tag	Sais. Wasser-/ Gasspeicher					

Je nach Anwendung und Größenklasse des Wasserstoffspeicherkraftwerks kommen verschiedene Arten der Speicherung infrage: Technisch gesehen unterscheiden sich die verschiedenen Speicherkonzepte v. a. durch die Umgebungsbedingungen – d. h. Druck und Temperatur, die einen Einfluss auf die volumetrische Energiedichte haben.

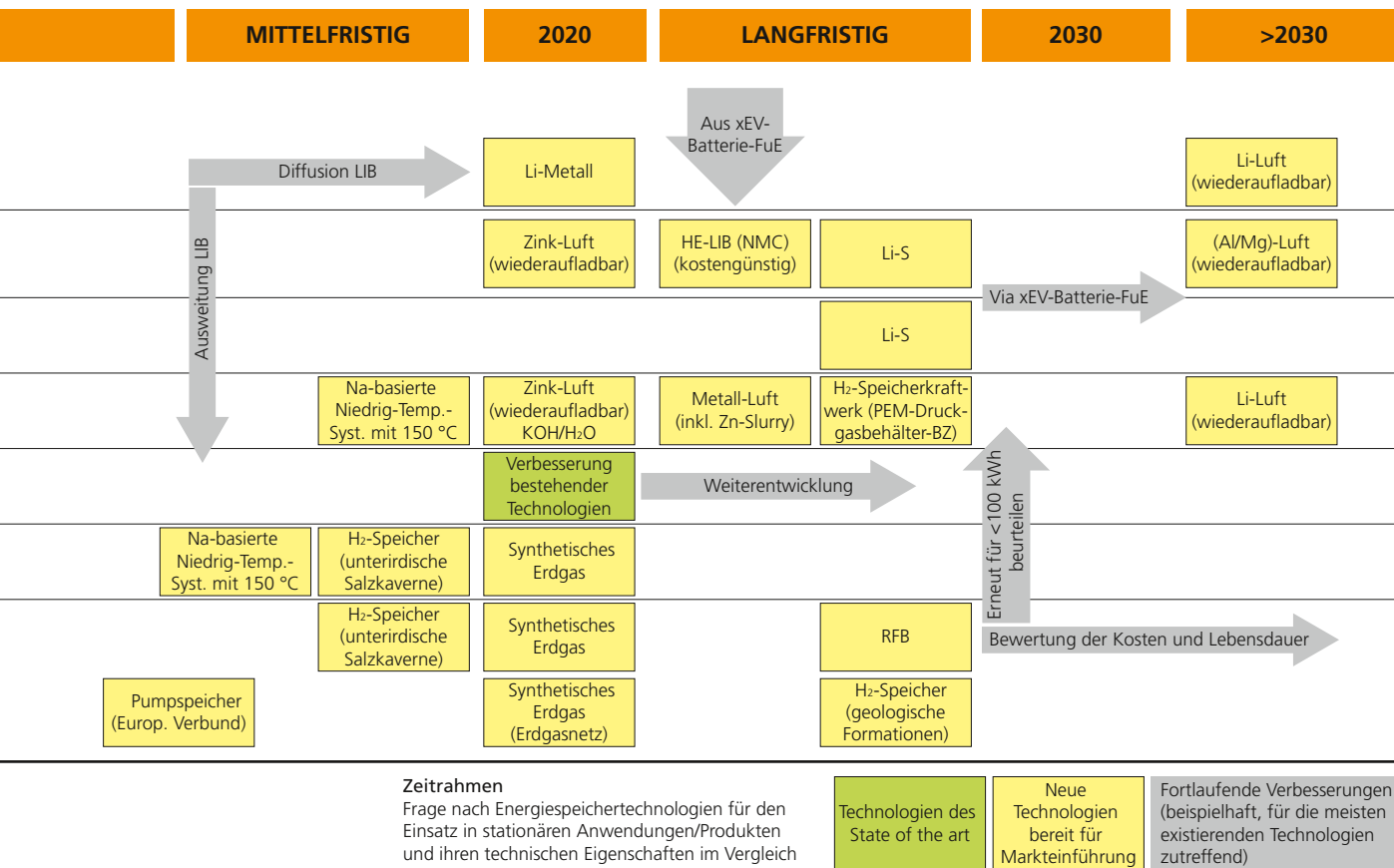
Für kleinere, dezentrale Speicher, wie sie beispielsweise in Verbindung mit Wind- oder Solarparks eingesetzt werden könnten, bieten sich Druckgasbehälter aus Stahl als Speicher an. Die Speicherung in diesen Behältern ist technisch erprobt: Bei Drücken zwischen 200 und 300 bar erfolgt die Speicherung in Stahlflaschen. Höhere Drücke können in Komposit-Tanks realisiert werden, die im Inneren aus Aluminium, Stahl oder Kunststoff bestehen und von einem Netz aus Kohlenstofffasern umgeben sind, wodurch eine hohe Festigkeit erzielt wird. Entsprechende Ultrahochdruckbehälter mit 700 bar sind seit einigen Jahren kommerziell verfügbar.

Solche Wasserstoffspeicher stehen mit mehr als 100 kW schon jetzt zur Verfügung: Die FuelCell Energy Solutions GmbH aus Dresden z. B., ein Joint Venture zwischen dem US-amerikanischen Unternehmen FuelCell Energy, Inc. und dem Fraunhofer IKTS

baut, vertreibt, installiert und betreibt sogenannte Brennstoffzellen-Kraftwerke von 250 kW bis 2,8 MW.⁴ Nach oben hin sind der Hochskalierung keine Grenzen gesetzt, solange der Platz reicht und die Abwärme sinnvoll genutzt werden kann, die Anlagen lassen sich aus beliebig vielen Modulen zusammensetzen.

Im Bereich der Natrium-basierten Systeme wie z. B. NaS oder ZEBRA-Batterien gibt es aktuell Anstrengungen, die Betriebstemperatur auf 150 °C zu senken. Mit diesem Niedrig-Temperaturbereich wird eine neue Generation Na-basierter Niedrig-Temperatur-Systeme erschlossen. Die Batterien werden mittelfristig als marktreif erachtet und könnten bis zum Jahr 2020 eingeführt werden. Hinsichtlich der SpeichergroÙe geht es um zwei Gruppen: „100 kWh–1 MWh“ und „1 MWh–1 GWh“, wobei sie aufgrund thermischer Restriktionen nicht für Systeme unter 10 kWh in Frage kommen. Die Lade-/Entladungszeit dieser Systeme wird steigen.

Metall-Luft-Batterien (inklusive Zink-Slurry) sind jenseits 2020 (wenn überhaupt, siehe oben) mit ihrem speziellen Elektroden-Aufbau zu erwarten.



Größere Wasserstoffspeicher-Kraftwerke sind eine Konsequenz der oben angesprochenen Hochskalierung und werden spätestens langfristig als marktreif erwartet: Die Module können bis in den zweistelligen MW-Bereich miteinander verschaltet werden.

1 MWh–1 GWh // <1 h

Pb und Pumpspeicher stellen den aktuellen Stand der Technik dar, wobei Pumpspeicher die zentral genutzte Technologie darstellen. LIB mit hoher Energiedichte könnten auch in dieser Größenklasse schon kurzfristig als marktreif an Attraktivität gewinnen.

Unkonventionelle Pumpspeicher können z. B. als im Atlantik versenkte Glocken oder geflutete Bergwerke etc. realisiert werden. Im Vergleich zu konventionellen Pumpspeichern liefern sie dieselbe Speicherkapazität mit einem vergleichbaren Wirkungsgrad (von mehr als 80 Prozent) bei bedeutend weniger Flächenbedarf (z. B. ca. 12 000 m² für bis zu 1200 MW Speicherleistung) und vermeiden deshalb den massiven Eingriff in die Umwelt, den die benötigten Oberbecken und Unterbecken für konventionelle Pumpspeicher zur Folge haben.⁵ Sie sind noch nicht marktreif.⁶ Prototypen haben eher noch kleinere Speicherkapazität. Die Verbesserung bestehender Technologien spielt darauf an, dass

vermutlich keine grundlegend neuen Konzepte aufkommen, aber die bestehenden bzw. bereits genannten Technologien weiter optimiert werden.

1 MWh–1 GWh // >1 h–1 Tag

Pb, NaS, ZEBRA-Batterie und Pumpspeicher sind die heutigen Referenztechnologien und verfügbar, Pumpspeicher dominieren. Allerdings gilt für die ZEBRA-Batterie, dass je kleiner sie sein soll, desto technisch schwieriger auch ihr Einsatz als Hochtemperatur-Batterie umzusetzen ist, da ihr Energiehaushalt verwaltet werden muss und entsprechende Begleitsysteme unabdingbar sind. Auch RFB in der Speichergöße von einigen MWh stehen bereits zur Verfügung.

Optimierte Druckluftspeicher (adiabatische mit Speicherung der Wärme zur Steigerung des Wirkungsgrades) werden für 4 bis 8 Stunden Speicherdauer ab 2015 als einsatzbereit eingeschätzt. Aktuell weisen sie noch einen zu geringen Wirkungsgrad (von etwa 50 bis 60 Prozent) auf, und dafür findet sich kein betreibendes Unternehmen (abgesehen von einigen nicht-kommerziellen Pilotanlagen). Das Konzept ist weitgehend technologisch umsetzbar, aber noch nicht im Markt aufgenommen.

Auch in dieser Speicherklasse werden Natrium-basierte Niedrig-Temperatur-Systeme mit ca. 150 °C bis 2020 als mögliche Lösung gesehen. Die NaS ist kostenbezogen jedoch stark im Nachteil z. B. im Vergleich zur Pb. Zudem ist derzeit nur ein Unternehmen weltweit (NGK Insulators Ltd. aus Japan) auf die NaS Technologie spezialisiert. Dieser Technologie wird daher in Deutschland (insbesondere mit Blick auf Na-basierte Niedrig-Temperatur-Systeme) noch relativ wenig Bedeutung beigemessen.

Wasserstoff-Speicher werden in dieser Energiespeicherklasse mittelfristig erwartet, bei großtechnischen Wasserstoffspeicherkraftwerken der zwei- bis dreistelligen MW-Klasse – vergleichbar mit den heutigen Pumpspeichern – bietet sich eine Speicherung in unterirdischen Salzkavernen an.⁷ Hier liegt der Betriebsdruck bei 20 bis 60 bar. Bei tieferliegenden Kavernen ist der maximale Betriebsdruck höher und die speicherbare Gasmenge steigt. Gleichzeitig steigt allerdings auch der nicht nutzbare Gasanteil, da eine gewisse Menge ständig in der Kaverne verbleiben muss, um einen Minimaldruck aufrecht zu erhalten.

Insbesondere in Norddeutschland bestehen hierfür sehr gute Ausbaupotenziale. Die Untertagespeicherung von reinem Wasserstoff in Salzkavernen ist in den USA und in Großbritannien seit Jahrzehnten erprobt. In Deutschland existieren zudem fundierte Erfahrungswerte für die unterirdische Speicherung von Erdgas sowie Stadtgas, das zum Großteil aus Wasserstoff besteht. Der Durchbruch von Wasserstoff-Speichern hängt von der kostengünstigen Herstellung von Wasserstoff in großen Mengen (Wasserstoffinfrastruktur) und damit insbesondere der Kostenentwicklung bei Elektrolyseuren ab und ist unter der Anforderung von „grüner“ Energiespeicherung eng mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland verknüpft.

Bezüglich Synthetischem Erdgas wird eine Marktreife frühestens ab 2020 erwartet, ggf. wird eine Verbreitung sogar erst ab 2030 erfolgen.

1 MWh–1 GWh // >1 Tag

Pumpspeicher sind heute der Stand der Technik. Günstige Standorte sind in Deutschland bereits relativ vollständig ausgebaut und ihr Ausbaupotenzial ist eher im internationalen Kontext (z. B. Skandinavien) noch nicht ausgeschöpft.

Wasserstoff-Speicher und synthetisches Erdgas kommen entsprechend ihrer Verortung in der oben genannten Speicherklasse auch hier zum Einsatz.

RFB sind heute im Bereich 100 kWh bis 1 MWh technisch verfügbar. Aufgrund vergleichsweise geringer Energiedichten (z. B. zu LIB) und einem komplexeren Systemaufbau konnten sie sich beispielsweise nicht für xEV-Anwendungen durchsetzen. Jedoch bieten die separierbaren und einfach mit Elektrolyten nachzufüllenden Flüssigtanks ein attraktives Konzept auch für stationäre Anwendungen, besonders für große Installationen, für welche sich der Wartungsaufwand rechnet. Somit ist für RFB zunächst die Gesamtkostenbetrachtung je nach Anwendungsfall zu betrachten. Für sehr große Anlagen könnten in der nächsten Dekade (2020–2030) daher weiterentwickelte, kostenreduzierte RFB (z. B. auf Basis günstigerer Rohstoffe als Vanadium) attraktiv werden. Gleichzeitig wäre für Anlagen <100 kWh das Geschäftsmodell neu zu bewerten. In jedem Fall stellt trotz des enormen Vorteils extrem hoher Zyklenzahlen (>>10 000 Zyklen) die ungewisse Langzeitstabilität (und damit die Einschätzung der kalendrischen Lebensdauer) einen Risikofaktor dar, welcher gerade für kleine Anwendungen in Privathaushalten sowie Großanlagen mit hohen Investitionen als kritisch anzusehen ist.

>1 GWh // >1 Tag

Pumpspeicher bzw. Dammspeicherkraftwerke (z. B. in Norwegen oder der Schweiz) in dieser Speicherklasse sind eher eine politische/regulative Angelegenheit bzw. eine Frage der entsprechend zu installierenden Stromleitungen.

Pumpspeicher im europäischen Verbund wären sofort Stand der Technik, wenn der europäische Netzverbund weiter ausgebaut werden würde. Dies ist aber noch nicht der Fall. In den Alpen werden die Pumpspeicher aber bereits weithin ausgebaut, weshalb für die Zukunft großes Potenzial existiert. Auch Skandinavien könnte einiges zu diesem Speicherverbund beitragen.

Synthetisches Erdgas könnte für größere GWh-Speicher am Erdgasnetz ab 2020 bereitstehen, sich allerdings auch auf nach 2030 verzögern.

Wasserstoff-Speicher dieser Speicherklasse werden ausschließlich in geologischen Formationen (siehe oben) verortet sein und in einem langfristigen Zeitraum verortet.

Der Bereich mit mehr als 1 MWh wurde in dieser Roadmap nicht vertiefend betrachtet, da elektrochemische Batteriekonzepte hier mit Ausnahme des Kurzzeitspeicherbereichs zukünftig wohl keine große Rolle spielen werden (die tatsächliche Grenze dürfte zwischen einer und etwa 20–30 MWh liegen). Mittelfristig werden in der MWh-Klasse v. a. Druckluftspeicher aufkommen, bei Lade-/Entladedauern von bis zu einem Tag.

EIGENSCHAFTEN AUSGEWÄHLTER ENERGIESPEICHERTECHNOLOGIEN

Da über mehrere Speicherklassen hinweg Blei-Säure-(Pb), Lithium-Ionen- (LIB) und Redox-Flow-Batterien (RFB) zueinander in Konkurrenz stehen, werden diese Technologien mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen und potenziellen Entwicklungen vertiefend betrachtet. Die Pb ist als Stand der Technik definiert und die Weiterentwicklung der Technologie zu drei Zeitpunkten (2015, kurzfristig nach 2015 sowie mittelfristig/langfristig nach 2020) bewertet. Die drei ausgewählten Systeme werden in den Bereichen <100 kWh sowie 100 kWh–1 MWh und mit Zyklisierungen im 1-Stunden- bzw. 1-Tages-Bereich herangezogen. Hinsichtlich der Bewertung sind keine quantitativen Leistungsdaten erfasst, sondern es wird eine qualitative Bewertung vorgenommen. Die Tabelle zum Vergleich von Leistungsparametern stationärer Energiespeichertechnologien (Seite 22/23) zeigt aber auch einen quantitativen Vergleich aus heutiger Sicht.

Als Vergleichstechnologie zur Pb weist die RFB eine hohe zyklische Lebensdauer, eine unabhängige Skalierbarkeit von Energie und Leistung, eine gute Wartungsfähigkeit und niedrigere Kosten auf. Für die Pb stellt die zyklische Lebensdauer einen Schlüsselparameter dar. Wird sie nicht verbessert, so wird diese Batterietechnologie speziell in Deutschland an Bedeutung verlieren. International dürfte sie aufgrund des geringen Preises aber selbst dann noch eine große Rolle spielen. Außerdem spielt bei Off-Grid-Anwendungen eher die kalendarische Lebensdauer eine Rolle, die Pb weist unter solchen Umgebungsparametern eine hohe kalendarische Lebensdauer auf. Oft sorgt eine eingeschränkte kalendarische Lebensdauer – z.B. hinsichtlich ungünstiger Umgebungsbedingungen – dafür, dass nicht die volle zyklische Lebensdauer erreicht wird. Die in Anwendungen der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) eingesetzten Pb erreichen kalendarische Lebensdauern von 10 bis 20 Jahren, wobei es sehr stark auf die jeweilige Anwendung ankommt.

Stand der Technik

Der Stand der Technik wird durch die Pb definiert (0, indifferent, neutral), die für sie dokumentierten Bewertungen hinsichtlich der Eigenschaften stellen die Referenz dar. Da die gravimetrische

Energiedichte für stationäre Energiespeicher keine besondere Rolle spielt, wird nur die volumetrische Energiedichte betrachtet, da z. B. die räumliche Verfügbarkeit bei stationären Energiespeichern oftmals relevant sein kann. Energie- und Leistungsdichten spielen bei stationären Energiespeichern ebenfalls keine vorrangige Rolle. Die Frage nach dem Wirkungsgrad ist wegen dessen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit deutlich wichtiger. Bei sämtlichen bewerteten Parametern gilt der Systembezug.

Da die Kosten der Pb den aktuellen Benchmark darstellen, müssen die LIB und die RFB diesen Benchmark erreichen, um gänzlich konkurrenzfähig zu werden. Die Umgebungsbedingungen werden im Folgenden nicht nur in Bezug auf die Temperatur interpretiert, sondern generell der Aufwand für den Systembetrieb gesehen.

Bewertung 2015

Für 2015 gilt die Pb im Bereich <100 kWh noch als Benchmark, obwohl die LIB (z. B. LFP/Graphit, aber auch andere Systeme) sowie die RFB in einigen Parametern besser sind, insbesondere der Lebensdauer. Jedoch sind die geringeren Investitionen für Pb oftmals noch der Grund, diese zu bevorzugen.

Die LIB hat bei großen Energieströmen einen deutlich verbesserten Wirkungsgrad. Auch in der zyklischen Kurzzeitspeicherung weist sie einen großen Vorteil auf. Der Nachteil bezgl. der Investitionen kann aber durch geringere Betriebskosten zum Teil kompensiert werden.

RFB sind hinsichtlich der kalendarischen Lebensdauer aufgrund der unklaren Langzeitstabilität positiv bewertet, hier liegt jedoch ein Schlüsselparameter für diese Technologie vor. Die Ansprüche an die Umgebungsbedingungen sind hoch und entsprechend schlechter zu bewerten als bei der Pb. Die Sicherheit ist gleich, die Kosten sind schlechter anzusetzen. RFB kommen für die Kurzzeitspeicherung nicht in Frage, weil z. B. ihr Stack noch viel zu teuer ist, weshalb die Investitionen und Betriebskosten als nicht relevant bewertet werden.

ZEIT →		2015				KURZFRISTIG								
Technologien im Vergleich		Pb (State of the art)		LIB (State of the art) (<100 kWh) 2015		Pb (<100 kWh) 2015		RFB (<100 kWh) 2015		LIB (LFP/LTO) (<1 MWh) 2015+		Pb (<1MWh) 2015+		
EIGENSCHAFTEN	Volumetrische... (Stundensp.)	Volumetrische... (Stundensp.)	0	0	+	+	0	0	0	0	++	+	0	0
	Energiedichte (Tagessp.)	Leistungsdichte (Tagessp.)	0	0	+	+	0	0	0	0	++	+	0	0
	Wirkungsgrad	(Stundensp.)	0	++	0	-	++	0						
		(Tagessp.)	0	+	0	-	+	0						
	Zyklische... (Stundensp.)	Kalendarische... (Stundensp.)	0	0	++	+	0	0	++	+	++	++	0	0
	Lebensdauer (Tagessp.)	Lebensdauer (Tagessp.)	0	0	+	+	0	0	++	+	++	++	0	0
	Umgebungs- bedingungen (Temperatur)	(Stundensp.)	0	+	0	-	+	0						
		(Tagessp.)	0	+	0	-	+	0						
	Sicherheit	(Stundensp.)	0	0	0	0	0	0						
		(Tagessp.)	0	0	0	0	0	0						
	Investitionen (Stundensp.)	Betriebs- (Stundensp.)	0	0	-	+	0	0	(irr) --	(irr) --	0	+	0	0
	Investitionen (Tagessp.)	Kosten (Tagessp.)	0	0	-	+	0	0	-	-	0	+	0	0

Bewertung für nach 2015/kurzfristig

Kurzfristig wird die Pb im Bereich von 100 kWh und 1 MWh gegenüber der LIB (insbesondere dem LFP/LTO-System) an Wettbewerbsfähigkeit verlieren. Die Pb kann sich zwar im Bereich der zyklischen Lebensdauer und Betriebskosten (durch höhere Zyklenfestigkeit) noch geringfügig verbessern. Bzgl. der Investitionen kann hier aber keine verlässliche Angabe gemacht werden, da sehr viel vom Batterie- und damit auch Rohstoffpreis abhängt und nur noch geringe Verbesserungspotenziale vorliegen.

Bei der LIB ergibt die bessere Energiedichte einen optimierten Materialeinsatz und damit geringere Systemkosten. Die Betriebskosten sinken mit steigender Lebensdauer. Für LIB ist die (zyklische und kalendarische) Lebensdauer ein zentraler Parameter.

In die Zyklenfestigkeit muss noch viel Aufwand gesteckt werden (bei unterschiedlichen elektrochemischen Systemen), damit die notwendige Investition geringer ausfallen kann. Hier kommt auch dem Batteriemanagementsystem eine große Bedeutung bzgl. der Kostenreduktionspotenziale zu. Letztlich sind Lebensdauer und Kosten die wesentlichen zu optimierenden Parameter.

RFB sind im Vergleich zum Stand der Technik zwar besser, was die Energie- und Leistungsdichte und Lebensdauern anbelangt, zeigen sich aber empfindlicher bzw. aufwändiger gegenüber den Umgebungsbedingungen und sind in der Investition teuer. Weil RFB aufgrund der enormen Investitionen und Kosten als Kurzzeitspeicher nicht in Frage kommen, fällt die Bewertung hier als irrelevant aus.

		MITTELFRISTIG	2020	LANGFRISTIG		2030	>2030		
RFB (<1 MWh) 2015+				LIB (HE/HV) (<100 kWh) >2020	Pb (<100 kWh) >2020	RFB (<100 kWh) >2020			
+	+			++	++	0	0	+	+
+	+			++	++	0	0	+	+
0				++		0		0	
0				+		0		0	
+	+			0	0	+	+	+	+
++	+			0	0	+	+	++	++
-				+		0		0	
-				+		0		0	
0				0		0		0	
0				0		0		0	
(irr)	(irr)			+	+	+	+	(irr)	(irr)
-	--			+	+	+	+	+	+
-	0			+	+	+	+	+	+

Zeitraumen
Frage nach Energiespeichertechnologien für den Einsatz in stationären Anwendungen/Produkten und ihren technischen Eigenschaften im Vergleich

Bewertung der Bedeutung einzelner Eigenschaften für die jeweilige Anwendung
(irr) irrelevant
+ besser
- schlechter
0 neutral
++ viel besser
-- viel schlechter

Referenz-
technologie

Vergleichs-
Technologien

Bewertung für nach 2020/langfristig

Für den Zeitraum nach 2020 wird die Pb (<100kWh) mit der LIB (Hochenergie/Hochvolt bzw. HE/HV) und der RFB (beide im Bereich <100kWh) verglichen. Die Pb wird sich sowohl in der Lebensdauer (auch kalendarisch!) als auch bei den Kosten (durch Skaleneffekte) übergreifend verbessern. Der Wirkungsgrad der Pb ist bereits sehr hoch (>80 Prozent), weshalb durchaus noch Verbesserungen möglich sind, aber gering ausfallen werden.

Hinsichtlich der Investitionen für die LIB ist durch die Forschung und Entwicklung an großformatigen Automotive-Zellen für die Elektromobilität mit einer deutlichen Kostenreduktion zu rechnen. Hierdurch können nach dem Jahr 2020 voraussichtlich weniger, da bessere Zellen in die Systeme eingebaut werden und damit

(sowie durch ggf. niedrigere Rohstoffpreise) die Kosten sinken. HE/HV-LIB sind im stationären Energiespeicher-Bereich durch den starken Fokus auf eine hohe Energiedichte aber nicht das System der Wahl, da dies auf Kosten anderer Parameter erfolgt, wie hier einer wiederum begrenzten Lebensdauer (<5000 Zyklen, bis 10 Jahre). Am Markt wird sich vielleicht eher ein System durchsetzen, welches mit einer niedrigeren Spannung entwickelt wird, dafür aber mit neuen Materialien eine höhere Zyklenfestigkeit erreicht (und damit HE statt HV erzielt).

Bei RFB muss man den Elektrolyt nicht warten und den Stack nur alle ca. fünf Jahre wechseln.⁸ Damit ergibt sich eine sehr gute zyklische Lebensdauer, aber „nur“ eine gute kalendarische Lebensdauer. Hinsichtlich der Umgebungsbedingungen sind diese Systeme aufwändig. Die Technologie sollte nicht für

die jeweilige Anwendung verwendet werden. Die Stärke der Vanadium-basierten RFB (VRFB) besteht darin, dass große Systeme mit einem großen Energie-zu-Leistungs-Quotienten aufwarten können. Da gerade die Kunden im Bereich stationärer Energiespeicher nicht bereit sind, für bestimmte Eigenschaften einen Aufpreis/Mehrpriß zu zahlen, sind die Kosten der gespeicherten Energie entscheidend (Euro/kWh), da hier die Investition, der Wirkungsgrad und die Betriebskosten erfasst werden.

Die RFB werden um 2020 voraussichtlich über bessere und günstigere Elektrolyten, Lösungsmittel und Elektrodenpaare verfügen („Post-Vanadium“, die Ressourcen könnten schnell zur Neige gehen). Außerdem sollten die Kosten im Upscaling-Prozess sinken. Generell sind offene, skalierbare Systeme eher schwer in einen Vergleich auf Stundenbasis einzubeziehen. So unterscheidet sich z. B. die kalendarische Lebensdauer für die VRFB zur LIB, da beim offenen System problemlos Komponenten ausgetauscht werden können. Energie- und Leistungsdichte werden im Vergleich zur Pb besser sein, die Kosten ebenfalls. Für Letzteres dürfte auch eine bessere Stack-Technologie sorgen. Als Kurzzeitspeicher wird die RFB nicht in Frage kommen, weshalb die Bewertung irrelevant bleibt.

Die Sicherheit ist hier über alle Technologien und Zeiträume durchgängig mit Null bewertet, was so zu interpretieren ist, dass alle Technologien grundsätzlich beherrschbar und keine Unglücke zu erwarten sind. Dennoch gilt die Sicherheit (z. B. besonders bei Anwendung in Privathaushalten) als absolute Voraussetzung für die durchgängige Akzeptanz und damit als ein Schlüsselparameter.

Als Kaufargument allerdings stehen die Kosten in Kombination mit der Nutzung über die Lebensdauer und dem Wirkungsgrad im Vordergrund. Hier sollten nicht nur Investitionen sondern wie oben beschrieben über die gesamte Produktlebensdauer die Kosten pro ausgespeicherter Energie bzw. die sogenannte Levelized Cost of Electricity betrachtet werden, um die technischen Lösungen wirtschaftlich vergleichen zu können.

Durch eine Berechnung der Stromgestehungskosten (engl. „levelized costs of electricity“, Abkürzung LCOE) ist es möglich, verschiedene Energiespeichertechnologien in Bezug auf ihre Kosten zu vergleichen. Grundsätzlich werden dabei die jährlichen Kosten für die Errichtung und den Betrieb der Energiespeicher über einen bestimmten Zeitraum aufaddiert, welche dann der über diesen Zeitraum ausgespeicherten Energie gegenüber gestellt werden. Die Ergebnisse der LCOE-Berechnungen werden in €/kWh angegeben.

LCOE-Bewertungen (z. B. IRENA 2012⁹) zeigen, dass Pumpspeicher (PHES) mit 0,05-0,15 €/kWh und große Druckluftspeicher (CAES) mit 0,10–0,20 €/kWh als zentrale Großspeicher aufgrund des hohen Reifegrads deutlich wirtschaftlicher als elektrochemische Energiespeicher sind.¹⁰ Jedoch sind die weiteren Kostenreduktionspotenziale typischerweise gering. Für dezentrale Anwendungen und die Integration von Erneuerbaren Energien im Kontext von Verteil- und Übertragungsnetz (VN/ÜN)-Dienstleistungen können elektrochemische Speicher heute schon wirtschaftlich sein.¹¹ Für Batterien ergeben sich je nach Anwendungsfall z. B. Natrium-Schwefel (NaS)-/ZEBRA-Batterie: 0,05-0,35 €/kWh, RFB: 0,15–0,35 €/kWh, Pb: 0,25–0,35 €/kWh, LIB: 0,30–0,65 €/kWh, wobei für die LIB das höchste Kostenreduktionspotenzial und daher künftig eine deutliche Verschiebung in den Bereich konkurrierender elektrochemischer Speicher erwartet wird.

LCOE-BEWERTUNGEN UNTERSCHIEDLICHER ENERGIESPEICHER

LCOE-Bewertungen unterschiedlicher Energiespeicher werden im Folgenden für die drei Anwendungsfälle

- Eigenbedarfsoptimierung (z. B. privat, gewerblich),
- Peak Shaving und
- Frequenzregelung (Primärregelleistung)

betrachtet. Hierfür sind die elektrochemischen Speicher Blei-Säure- (Pb), Lithium-Ionen- (LIB), Natrium-Schwefel- (NaS) und Vanadium-Redox-Flow-Batterie (VRFB) sowie je nach Anwendungsfall weitere alternative Energiespeicher (z. B. Pumpspeicher (PHES) oder Schwungräder (FES)) relevant.

Die hier eigens berechneten LCOE dienen lediglich dem Ziel, verschiedene Energiespeicher vergleichbar zu machen. Für eine genaue Betrachtung und um die Wirtschaftlichkeit einer bestimmten Anlage zu bestimmen, müsste unter Berücksichtigung der genauen Werte auf Basis eines Cashflow-Modells eine Finanzierungsrechnung durchgeführt werden.

Einflüsse der Betriebsweise wie beispielsweise unterschiedliche Entladungstiefe (engl. „Depth of discharge“, Abkürzung DoD) und Umwelteinflüsse sind nur schwer zu berechnen und wurden hier nicht berücksichtigt. Auch Zinsen, welche durch eine mögliche Finanzierung entstehen, die aktuellen Strompreise und eventuelle Förderungen von Staat, Ländern, oder Banken würden das Ergebnis beeinflussen, wurden jedoch nicht in die Rechnung einkalkuliert.

Für die Berechnungen¹² wurden verschiedene Eingangsparameter der Energiespeicher und der betrachteten Anwendungsfälle verwendet und mit aktueller Literatur abgeglichen.¹³ Die Werte der einzelnen Energiespeicher sind in drei Bereiche unterteilt: Die durchschnittlichen Werte, der Interquartilsabstand (IQR), in welchem 50 Prozent der untersuchten Daten liegen, und die gesamte Bandbreite mit minimalen und maximalen Werten.

Im Folgenden sind die Eingangsparameter kurz erklärt: Die Investitionen (engl. „Capital expenditure“, Abkürzung CAPEX) beinhalten alle Kosten, welche für die Anschaffung, das Auf-

stellen und das Anschließen des Energiespeichers anfallen.¹⁴ Die Investitionen setzen sich aus Kosten für den Stromwandler und die Verkabelung (engl. „Power conversion system“, Abkürzung PCS), Anlagenperipherie (engl. „Balance of plant“, Abkürzung BoP), wie beispielsweise Projektplanung, Netzanschluss, Schutzvorrichtungen, Steuerung und Sensorik zusammen. Hinzu kommen die Kosten für den eigentlichen Energiespeicher (engl. „storage section“), welche sich aus den Kosten für das Batteriesystem und für den Aufbau ergeben.

Betriebskosten (engl. „Operation & maintenance cost“, Abkürzung „O&M costs“ oder auch OPEX genannt) bestehen aus festen jährlichen O&M-Kosten (in €/kW*a) und variablen O&M-Kosten (in €/kWh). Die festen Kosten sind beispielsweise Versicherungskosten, Zinsen oder fest eingeplante Wartungen nach einer bestimmten Zeit. Die variablen Betriebskosten sind z. B. Wartungs- und Reparaturkosten oder der Strompreis und hängen davon ab, wie viel Energie der Energiespeicher im Jahr speichert.

Nach dem Überschreiten einer bestimmten Zyklenzahl oder nach einer vorgegebenen Lebensdauer in Jahren müssen eventuell Bauteile eines Energiespeichers erneuert werden. Die Austauschkosten werden in €/kW angegeben und ins Verhältnis zu dem betrachteten jährlichen Zeitraum gerechnet (€/kW*a).

Die Lebensdauer der Energiespeicher ist ausschlaggebend für die eventuell anfallenden Austauschkosten. Angegeben werden die kalendarische Lebensdauer und die zyklische Lebensdauer. Da die Kosten im Bezug zu der ausgespeicherten Energie der Speicher dargestellt werden, wird der Wirkungsgrad η ebenfalls in die Berechnungen einbezogen.

Mit dem Diskontsatz können in der Zukunft liegende Kosten auf ihren aktuellen Wert umgerechnet werden. Je nach Anwendungsfall kann der Diskontsatz variieren und bewegt sich im Bereich von 4 bis 8 Prozent. Hier wurde mit einem Wert von 6 Prozent gerechnet. Mit einem höheren Diskontsatz steigen die Kosten pro kWh.

Um einen Vergleich zu ermöglichen muss für alle Speicher ein bestimmter Betrachtungszeitraum festgelegt werden. Die hier angestellten Berechnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 15 Jahren. Eine Veränderung des betrachteten Zeitraumes führt zu einer Veränderung der Ergebnisse.

Zu der Eigenbedarfsoptimierung gehören beispielsweise Hausspeichersysteme, welche hier im Kern betrachtet werden. Die Ergebnisse können aber auch auf größere Systeme zur Eigenbedarfsoptimierung transferiert werden, in welchen NaS und VRFB relevant werden. Bei der Frequenzregelung handelt es sich um die Primärregelung, welche für maximal 15 Minuten bereitgestellt werden muss. Als Peak Shaving wird die Bereitstellung von Spitzenlast verstanden. Für die Berechnung wurde, mit Ausnahme der Frequenzregelung, die vereinfachte Annahme getroffen, dass bei einem Zyklus der Speicher einmal vollständig aufge- und entladen wird. Bei den 34 Zyklen der Frequenzregelung handelt es sich um kleine Zyklen von im Durchschnitt nur 38 Sekunden.¹⁵ In Bezug auf die maximal benötigte Entladezeit von 15 Minuten entspricht dies einer Entladetiefe von etwa 5 Prozent (DoD = 5 Prozent). Da die Zyklenzahlen der Batteriespeicher abhängig von der Entladetiefe sind, wurden die Zyklen für die Frequenzregelung näherungsweise linear an die 5 Prozent DoD angepasst.

Durch die breite Streuung der in der Literatur angegebenen Werte (aufgrund vielfältiger Unsicherheiten und Unterschiede bzgl. des zeitlichen und Systembezugs der Kostenannahmen und -entwicklungen sowie der technischen Parameter, welche weiterhin nach Auslegung und Art des einzelnen elektrochemischen Speichers zu differenzieren wären) ergibt sich ein sehr breites Spektrum an Ergebnissen für die LCOE.

Besonders bei der Frequenzregelung ergeben sich große Unterschiede. Dies ist auf die hohe benötigte Leistung bei verhältnismäßig geringer ausgespeicherter Energie in Verbindung mit großen Unterschieden bei den Zyklenzahlen zurückzuführen, welche sich aus der Anpassung der Zyklen auf die Entladetiefe von 5 Prozent ergibt.

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die Frequenzregelung aufgrund der bereits erwähnten hohen Leistung bei relativ geringer Ausspeicherenergie, die teuerste der betrachteten Anwendungen ist. Die LCOE der elektrochemischen Speicher bewegen sich größtenteils auf dem Niveau der betrachteten mechanischen Speicher. Jedoch sind RFB und NaS für diesen Anwendungsfall konzeptionell nicht geeignet (>Stundenspeicher) und Pb-Batterien sind zudem aufgrund der zyklischen Lebensdauer im Nachteil. Die Systeme sind aber zu Vergleichszwecken aufgenommen.

Beim Peak Shaving sind derzeit z. B. Pumpspeicherkraftwerke die günstigere Lösung und zum Vergleich aufgenommen. Bei der Frequenzregelung werden elektrochemische Speicher z. B. mit den noch wirtschaftlicheren Schwungrädern verglichen. Die verwendeten Werte für das Schwungrad haben jedoch eine extrem hohe Bandbreite. Schwungräder werden bei einer Entladezeit von Sekunden bis zu 30 Minuten eingesetzt. Die angegebenen Daten unterscheiden jedoch nicht zwischen den unterschiedlichen Anforderungen an die Schwungräder, was zu dem breiten Spektrum, besonders bei den Kosten der eigentlichen Speichereinheit, führt. Folglich sind die Ergebnisse für das Schwungrad nur bedingt aussagekräftig, bzw. wäre weiter zu differenzieren. Aufgrund des begrenzten Gesamtmarktes für Frequenzregelung ist ein Vergleich schwierig, da letztlich Einzelentscheidungen getroffen werden.

Die Kosten bei der Eigenbedarfsoptimierung (Hausspeichersysteme) zeigen, dass es derzeit noch wirtschaftlicher ist, den Strom einer Photovoltaik (PV)-Anlage ins Netz einzuspeisen. Teilweise bewegen sich die LCOE der Energiespeicher gerade aber an der Grenze der „Grid parity“. In Zukunft wird, bei einem Wegfall der Einspeisevergütung, in Verbindung mit sinkenden Kosten für die elektrochemischen Speicher, die Speicherung der Energie noch attraktiver werden. Bei Anwendungen mit hohen Zyklenzahlen kann es bereits heute kostengünstiger sein, LIB anstatt den eigentlich günstigeren Pb einzusetzen. In diesem Fall sind die Zyklen der Pb-Batterie aber ausreichend.

Annahmen der Parameter nach Anwendungsfällen

	Leistung (kW)	Energie (kWh)	Entladezeit (h)	Zyklen/Tag	Ausgespeicherte Energie $M_{a,el}$ (kWh/a)
Eigenbedarfsoptim.	2,5	10	4	0,6	2190
Frequenzregelung	2000	500*	0,25	34	310 250
Peak Shaving	100	250	2,5	2	182 500

*Limitierender Faktor: Zur Auslegung des Falls werden Batteriekapazitäten ggf. >5000kWh benötigt und sind den Kosten zu Grunde zu legen.

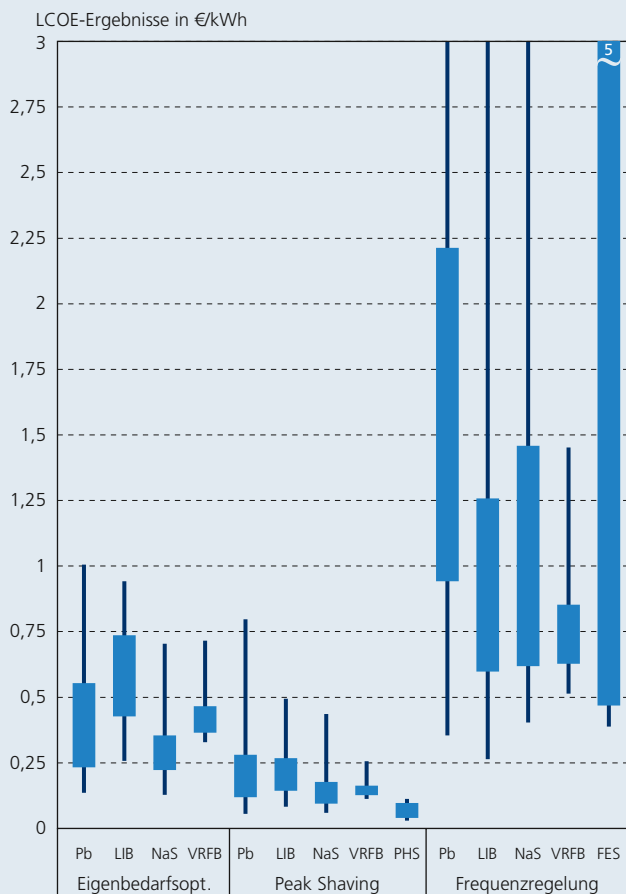
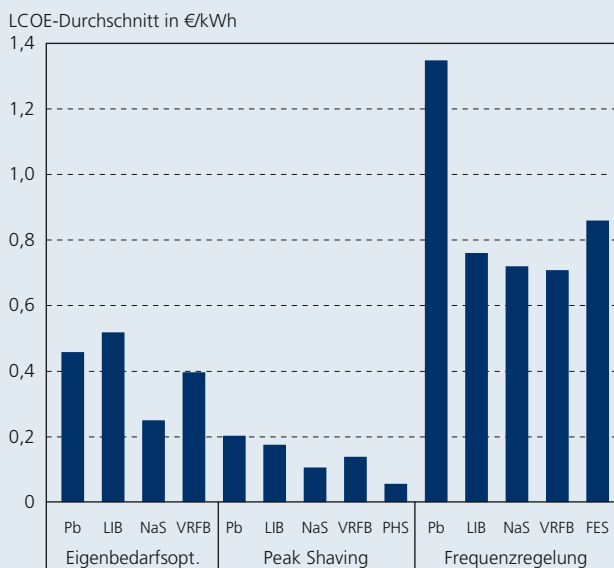
Für weitergehende Berechnungen wären sowohl die einzelnen Speichertechnologien inklusive der Kosten (diese sind in den vorliegenden LCOE-Berechnungen der Literatur entnommen und liegen heute, besonders für die LIB, bereits deutlich tiefer, d. h. ab 2015/2016 wäre z. B. für die Eigenbedarfsoptimierung das Ergebnis weiter zugunsten der LIB zu verschieben) und Leistungsparameter weiter zu differenzieren (z. B. LIB auf LFP/ Graphit-, LFP/LTO-, NMC/Graphit-Basis oder neben VRFB auch ZnBr-RFB etc.) und auch deren künftige Entwicklungspotenziale differenzierter abzuschätzen. Zudem sind nicht nur diese und weitere Anwendungsfälle zu betrachten, sondern auch der kombinierte Einsatz bzw. die Auslegung auf mehrere Anwendungen (dem sogenannten „Multi-purpose design“).

Die in den LCOE-Berechnungen analysierten Anwendungen entsprechen den in der „Produkt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ hinsichtlich der Anforderungen vertieften Anwendungen (1. On-Grid-PV zur Eigenbedarfsoptimierung, 2. Eigenbedarfsoptimierung Campus/Gewerbe/Industrie mit >5 MW,

3. Industrie: Deckelung Anschlusswerte Peak Shaving (Korea)) sowie den in der „Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ hinsichtlich der Technologie-spezifischen Substitutionspotenziale und Marktentwicklung vertieften Anwendungen (A1: Dezentrale, netzgekoppelte PV-Batteriesysteme zur Eigenbedarfsoptimierung, A2: Multi-purpose Eigenbedarfsoptimierung & Peak Shaving, A4: Regelleistung) und ergänzen diese Roadmaps um Bewertungen der Wirtschaftlichkeit elektrochemischer Speicher.

Weiterhin sind in der „Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ unterschiedliche Pb- und LIB-Systeme zur Eigenbedarfsoptimierung PV-Batteriesysteme in privaten Haushalten (Endkundenpreise) weitergehend bzgl. der Elektrizitätskosten (€/kWh*Zyklen) differenziert. Die generellen Aussagen sind trotz unterschiedlicher Berechnungsansätze (bzw. -tiefe) konsistent und eine Differenzierung unterschiedlicher LIB-Zellchemien wird zudem möglich.

LCOE-Bewertungen unterschiedlicher Energiespeicher



Ergebnisse der LCOE-Berechnungen. Der dicke, hellblaue Balken stellt die Werte im Interquartilsabstand dar, der dünne Balken die Werte der gesamten Bandbreite.

LEISTUNGSPARAMETER STATIONÄRER ENERGIESPEICHERTECHNOLOGIEN

Technologie ¹⁶	MW	MWh	Reakt.-zeit	Wh/kg	Wh/l	W/l
PHES	100 MW–1 GW	100 MWh–1 GWh	min	0,2–2	0,2–2	0,1–2
CAES	10 MW–100 MW	100 MWh–1 GWh	min		2–6	0,2–0,6
Schwungrad	20 kW–10 MW	0,1 kWh–1 MWh	< sec	5–30	20–80	5000
Pb	1 kW–10 MW	1 kWh–1 MWh	< sec	30–50	60–100	90–700
NiCd	1 kW –100 kW		< sec	15–45	15–110	75–700
NiMH	1 kW –1 MW		< sec	40–80	80–200	500– 3000
LIB	1 kW –10 MW	1 kWh –10 MWh	< sec	60–200	200–400	< 1000
Zn-Luft	50 kW–20 MW		< sec	130–200	130–200	50–100
NaS	30 kW–10 MW	100 kWh–100 MWh	< sec	100–250	150–300	120–160
NaNiCl ₂	100 kW–10 MW		< sec	100–200	150–200	250–270
VRFB	50 kW–20 MW		sec	15–50	20–70	0,5–2
Hybrid-Flow-Batterie	50 kW–20 MW		sec	75–85	65	1–25
H ₂ zentral/ dezentral	1 MW–GW	10 MWh–100 GWh	sec–min	33.330	600 (200 bar)	0,2–2 2,0–20
SNG	1 MW–GW	10 MWh–100 GWh	min	10000	1800 (200 bar)	0,2–2
EDLC	20 kW–1 MW	0,1 kWh–5 kWh	< sec	1–15	10 –20	40000–120000
SMES	100 kW–2 MW	0,1 kWh–10 kWh	< sec	1–10	6	2600
Molten salt	30–300		n. a.	85–280	n. a.	n. a.

	Entlade-Dauer*	Effizienz [%]	Lebens-dauer [a]	Zyklen	Technische Reife	Typische Anwendungen
	h-d-w	70–80	>50	>5 000	reif	Time Shifting, Spannungsqualität, Notstromversorgung
	h-d	41–75	>25	>10 000	entwickelt (Potenziale bei adiab.)	Time Shifting
	sec	80–90	15–20	20 000–10 Mio	reif (Potenziale bei hoch Geschw.)	Spannungsqualität
	sec-h-d	75–90	3–15	250–1500	reif	Inselanlage, Notstromversorgung, Time Shifting, Spannungsqualität
	h	60–80	5–20	500–3000	reif	Off-Grid, Notstromversorgung, Time Shifting, Spannungsqualität
	h	65–75	5–10	600–1200	reif	HEV
	h-d-w	85–95	5–20	<1000–15 000	entwickelt/reif (Potenziale bei großform., Kostenred.)	EV, Spannungsqualität, Netzwerkeffizienz, Off-Grid, Time Shifting
	h	50–70	> 1	>1000	in Entwicklung	Off-Grid, EV
	h-d	70–85	10–15	2500–4500	reif (Entwicklung von Niedrig-Temperatur-Syst.)	Time Shifting, Netzwerkeffizienz, Off-Grid
	h	80–90	10–15	1000	reif (Entwicklung von Niedrig-Temperatur-Syst.)	Time Shifting, EV
	h-d-w	60–75	5–20	>10 000	in Entwicklung/entwickelt	Time Shifting, Netzwerkeffizienz, Off-Grid
	h	65–75	5–10	1000–3650	in Entwicklung	Time Shifting, Netzwerkeffizienz, Off-Grid
	h-w	34–44	10–30	1000–10 000	in Entwicklung	Time Shifting
	h-w	30–38	10–30	1000–10 000	in Entwicklung	Time Shifting
	sec	85–98	4–12	10 000–100 000	reif (Entwicklung von Hochenergie)	Spannungsqualität
	sec	75–80	n. a.	n. a.	in Entwicklung	Time Shifting, Spannungsqualität
	h	40–93	n. a.	n. a.	entwickelt	Integration EE auf Energieversorger-Ebene

* h=Stunde, d=Tag, w=Woche

FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSAKTIVITÄTEN

Ausgehend von den in der Roadmap verorteten technischen Entwicklungen sowie der Leistungsparameter stationärer Energiespeichertechnologien und deren anwendungsspezifischen Wirtschaftlichkeitsbewertung geben Publikations- und Patentanalysen Aufschluss über den aktuellen Grad der FuE-Aktivitäten.

Für die wichtigsten bzw. ausgewählte Energiespeichertechnologien wurden Publikationsanalysen anhand stichwortbasierter Suchstrategien durchgeführt. Für Batterietechnologien sind innerhalb des Feldes liegende Technologien als hierarchische Suchstrategien aufgebaut, um diese direkt vergleichbar zu machen (siehe „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen Batterien 2030“). Die Suchabfragen erfolgten über das Web of Science (WoS) für den Zeitraum der letzten 5 Jahre (2010 bis 2015), um das Publikationsaufkommen in diesem Zeitraum relativ zu den Aktivitäten im Bereich der Batterieforschung insgesamt (normiert auf 100) zu betrachten sowie dem durchschnittlichen Wachstum in diesem Zeitraum (Dynamik) gegenüberzustellen. Es werden weltweite und deutsche Forschungsaktivitäten verglichen.

Die Batterie-FuE in Deutschland liegt mit 30 Prozent Wachstum gegenüber 20 Prozent weltweit aktuell deutlich über dem weltweitem Durchschnitt und die Forschung an LIB (rund 70 Prozent der Batteriepublikationen) zeigt eine hohe Dynamik auf hohem Publikationsniveau. Post-LIB- (z. B. Li-S) aber auch RFB-Publikationen zeigen eine sehr hohe Dynamik auf dem Niveau weniger Prozent aller Publikationen. Batterietechnologien mit vergleichbarem Wachstum aber vergleichsweise geringeren Publikationsaktivitäten sind Pb, Supercaps, Li-Polymer und Li-Feststoff. Wasserstoffspeicher- und BZ-Technologien, CAES, SMES etc. weisen z. T. hohe Publikationsaktivitäten, aber aktuell geringere Wachstumsraten auf. Na-basierte Hoch-Temperatur-Systeme zeigen eine hohe Dynamik auf sehr geringem Niveau (die FuE in Deutschland ist vergleichsweise vernachlässigbar) und NiCd, NiMH zeigen geringe FuE-Intensität und -Dynamik.

Das gleiche Vorgehen (stichwortbasierte Suchstrategien, vorab nach sogenannten Internationalen Patent-Klassen (engl. „international patent class“, Abkürzung IPC) wie z. B. der Klasse H01M für elektrochemische Energiespeicher strukturiert) erfolgte

auch für die Patentanalysen (zwischen 2009 bis 2013). Diese wurden in der Datenbank „Derwent World Patents Index® (DWPI SM)“ durchgeführt. Anhand sogenannter transnationaler Patente (engl. „European Patent/Patent Cooperation Treaty“, Abkürzung (EP/PCT)) wurde ein Ländervergleich durchgeführt, der international relevante „Schlüssel-Patentanmeldungen“ betont. An dieser Stelle werden weltweite und europäische Patentanmeldungen verglichen, da gerade bei Technologien mit geringen Anmeldezahlen die Vergleiche bis auf die nationale Ebene schwierig werden.

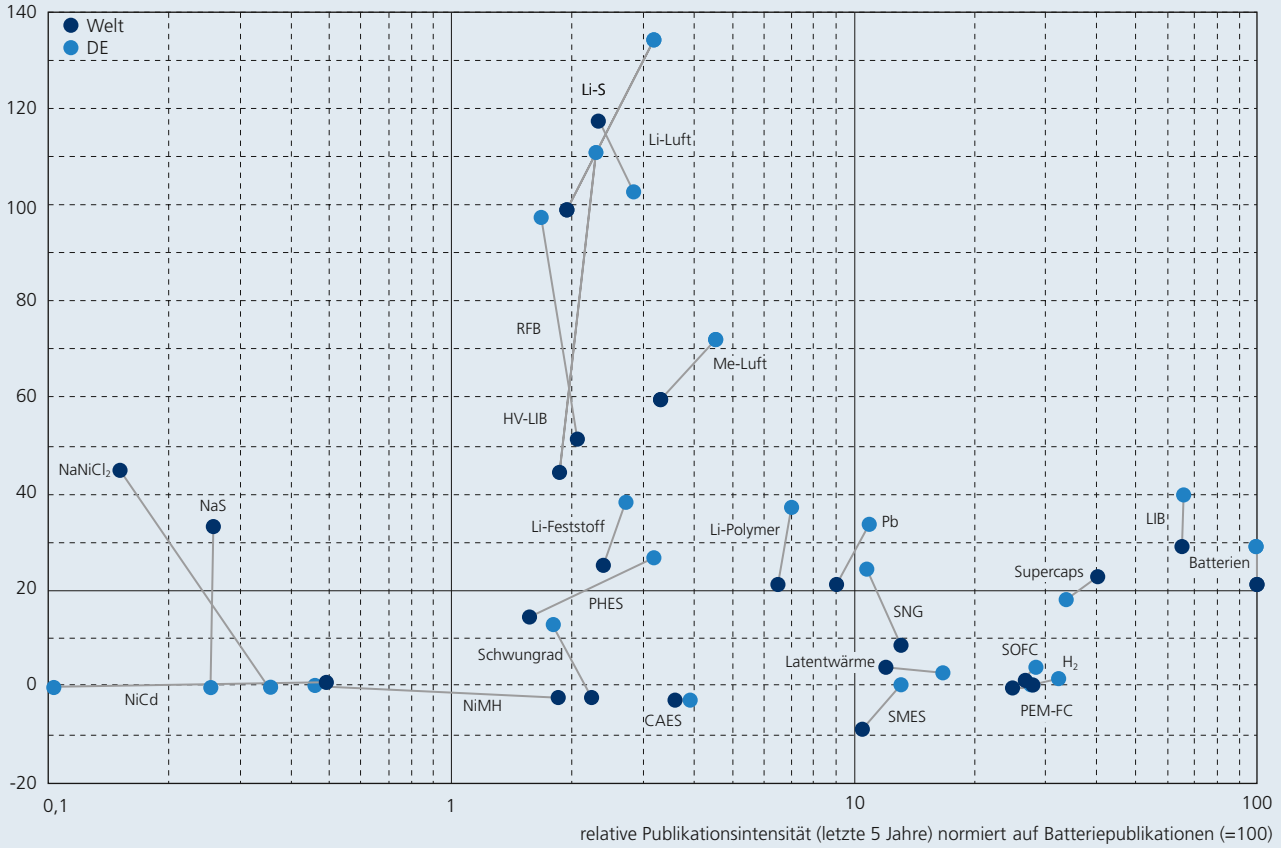
Auch bei Patentanmeldungen zeigt sich ein ähnliches Bild wie für Publikationen (die Anmeldedynamik Europas ist hier jedoch im weltweiten Vergleich geringer). Wieder zählen Li-S, Li-Luft, RFB etc. zu sich dynamisch entwickelnden Technologien im Prozent-Bereich (vgl. zu Batterien). Anmeldungen zu NaNiCl_2 sind auf sehr geringem Niveau dafür sehr dynamisch. Eine große Zahl von Technologien zeigt aber eine Dynamik zwischen einigen Prozent bis unter 20 Prozent und Anmeldezahlen zwischen 2 bis 20 Prozent im Vergleich zu den Batterie-spezifischen Anmeldungen. Oftmals weist Europa im weltweiten Vergleich eine höhere (relative) Anmeldeaktivität auf, was auf eine technologisch ausdifferenzierte FuE in Wissenschaft und Industrie hinweist.

Die Publikations- und Patentanalysen geben indirekt Aufschluss über den Reifegrad der Technologien: Eine hohe Dynamik auf hohem FuE-Aktivitätsniveau weist auf aktuell bedeutende und sich stark entwickelnde Technologien hin. Bei hoher Dynamik auf geringem FuE-Aktivitätsniveau handelt es sich tendenziell um noch sehr junge Entwicklungsfelder. Geringe Dynamik und hohes Aktivitätsniveau ist ein Hinweis auf reife Technologien und geringe Dynamik auf geringem Aktivitätsniveau weist auf Technologien hin, welche an Relevanz verlieren oder deren Entwicklung sich noch nicht klar abzeichnet.

Gleichzeitig sind Publikationsentwicklungen stets eher vor einem langfristigeren Zeitraum (stärker grundlagenorientiert) und Patentanmeldungen eher vor einem kurzfristigeren Zeitraum (anwendungsnahe mit zeitnahen Vermarktungsabsichten) zu interpretieren. Die Ergebnisse geben ein plausibles Bild der Entwicklungspotenziale einzelner Technologien wieder.

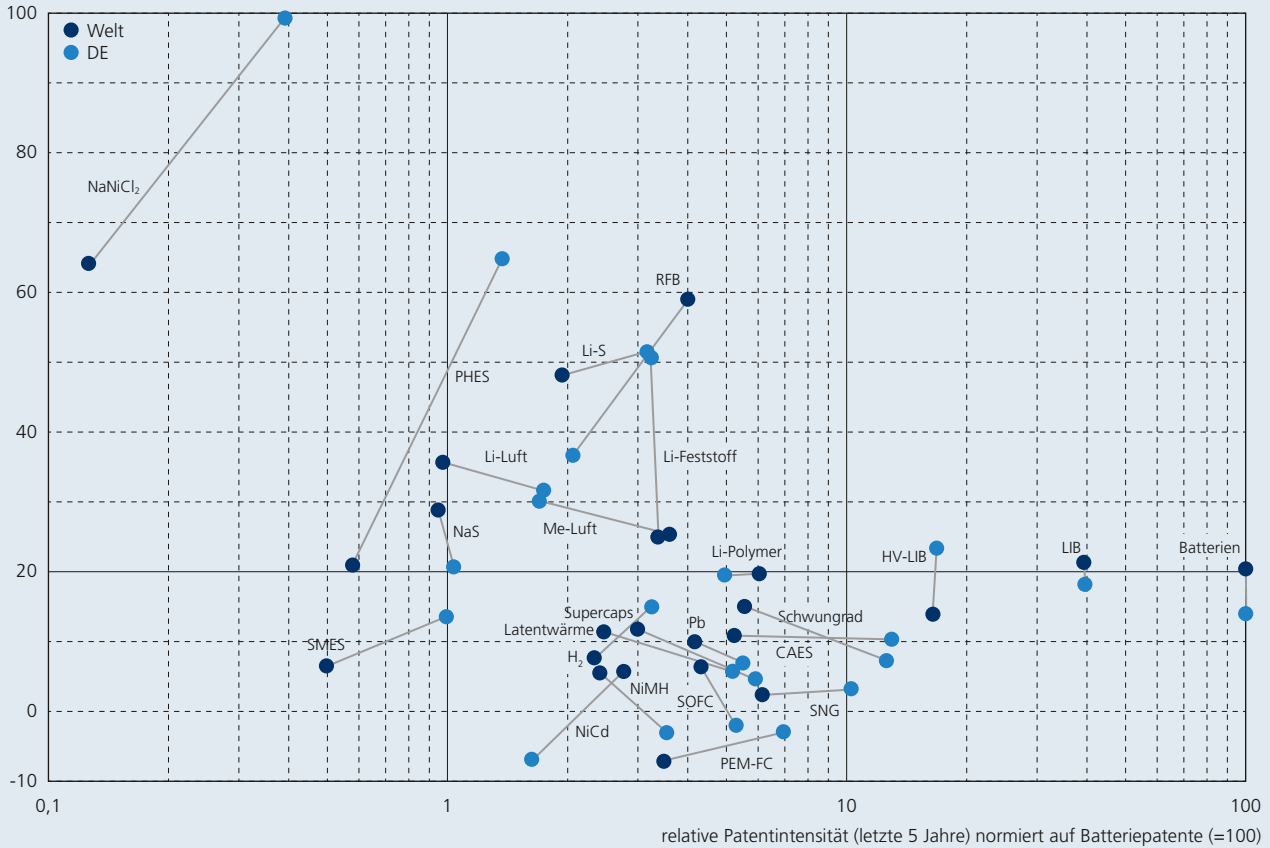
Wissenschaftliche FuE-Aktivitäten zu stationären Energiespeichern

Mittlerer Wachstum (letzte 5 Jahre) in %



Technologische FuE-Aktivitäten zu stationären Energiespeichern

Mittlerer Wachstum (letzte 5 Jahre) in %



FAZIT UND AUSBLICK

FAZIT

Die vorliegende Technologie-Roadmap identifiziert zentrale Energiespeichertechnologien mit Fokus auf der Lithium-Ionen-Batterie (LIB) für den Einsatz in stationären Anwendungen in mehreren Speicherklassen entsprechend ihrer Speichergröße und typischen Lade-/Entladedauer.

Neben bereits heute in vielen Speicherklassen konkurrenzfähigen LIB auf LFP/Graphit-Basis und deren weiteren Optimierung (z. B. LFP/LTO-System) könnten stark in den Kosten reduzierte LIB (welche durch den Einsatz in Elektrofahrzeugen ohnehin vorhanden sein werden) ab 2020–2030 zunehmende Konkurrenz zu traditionellen stationären Energiespeichern wie Blei-Säure-Batterie (Pb), Druckluft- und Pumpspeichern darstellen. Auch Redox-Flow-Batterien (RFB) und Natrium-Schwefel-Batterien (NaS) haben Chancen, sich in weiteren Speicherklassen und Anwendungen zu etablieren.

Historisch hat es allerdings schon öfter Technologien gegeben, welche für einen gewissen Zeitraum rentabel waren und dann doch wieder vom Markt verschwanden bzw. sich nicht durchsetzten. Trotz eines diversifizierten Portfolios von Energiespeichertechnologien werden sich vermutlich nicht beliebig viele Systeme (eher wenige ausgewählte und dann standardisierte) in den zahlreichen Anwendungen etablieren können. Diese konkurrieren weiterhin oder gar vermehrt mit alternativen Flexibilisierungsoptionen neben der Speicherung von Energie.

AKTUALISIERUNG DER ROADMAP

Die „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ ist ein lebendiges Planungsdokument. Sie wurde in dem durch das BMBF geförderte Roadmapping-Begleitvorhaben zur Innovationsallianz LIB 2015 entwickelt und wird in der Begleitmaßnahme Batterie 2020 weiterhin aktualisiert und vertieft werden. Beim Fraunhofer ISI ist eine Projektwebseite eingerichtet, um die Roadmap zu kommentieren und Anregungen für die Weiterentwicklung einfließen zu lassen. Die Roadmap kann unter dem folgenden Link heruntergeladen werden: www.isi.fraunhofer.de/trm-sesroad.php.

Die vorliegende Technologie-Roadmap wird durch die „Produkt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ und die „Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ ergänzt.

BENACHBARTE PROJEKTE ZUR ELEKTROMOBILITÄT

Das Fraunhofer ISI bearbeitet eine Reihe von Forschungsprojekten rund um Energiespeichertechnologien, für die Elektromobilität und stationäre Energiespeicherung jeweils mit spezifischen Arbeitsschwerpunkten. Das Spektrum reicht von einem systemischen Ansatz mit einer Untersuchung sozio-ökonomischer Aspekte in diesen Bereichen über Fragen der Energiebereitstellung, der Ausgestaltung einer Ladeinfrastruktur und der Entwicklung von Batterie- und Fahrzeugkonzepten, Geschäftsmodellen für stationäre Speicher bis hin zu neuen Mobilitätskonzepten und der Nutzerakzeptanz.

AUSGEWÄHLTE PROJEKTE

PROJEKT	ARBEITSSCHWERPUNKTE DES FRAUNHOFER ISI	FÖRDERUNG
Roadmapping-Begleitvorhaben zur Innovationsallianz LIB 2015	Roadmapping hinsichtlich der technologie- und marktseitigen Entwicklungsmöglichkeiten für Lithium-Ionen-Batterien (LIB)	BMBF
Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR)	Projekt mit Schwerpunkt Technologie-Monitoring im Rahmen der Fördermaßnahme Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)	BMBF
BEMA 2020 – Begleitmaßnahme zu Batteriematerialien für zukünftige elektromobile und stationäre Anwendungen	Fortführung des Monitoring (EMOTOR) und Roadmapping (LIB2015) zu Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität und stationäre Anwendungen, gemeinsam mit dem Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien (KLIB) und dem Münster Electrochemical Energy Technology (MEET) der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (WWU Münster)	BMBF
Themenfeld Nutzerakzeptanz	Sozialwissenschaftlich orientierte Vernetzung von Projekten zur Kundenakzeptanzforschung	BMVBS
Innovationsreport „Systembetrachtung Elektromobilität“	Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt	TAB
Regional Eco Mobility (REM) 2030	Entwicklung eines Konzeptes für und Umsetzung einer effizienten regionalen Individualmobilität für 2030	FhG, Land Baden-Württemberg
Studie „Elektromobilität weltweit: Baden-Württemberg im internationalen Vergleich“	Benchmarking der Leistungsfähigkeit von in der Elektromobilität weltweit führenden Automobil-Regionen, zum Beispiel Aichi und Tokio in Japan oder Seoul in Südkorea	e-mobil BW GmbH
Studie „Wertschöpfungspotenziale im Leichtbau und deren Bedeutung für Baden-Württemberg“	Analyse und Darstellung der Leichtbau-Wertschöpfungsketten im Land Baden-Württemberg für ausgewählte Technologien inklusive technischer und wirtschaftlicher Potenziale und Hemmnisse für die Zukunft	Leichtbau BW GmbH
Studie „Leichtbau – Trends und Zukunftsmärkte und deren Bedeutung für Baden-Württemberg“	Identifikation von Anwendungsfeldern für Leichtbautechnologien und Quantifizierung von sowohl Marktgröße als auch -wachstum bis ins Jahr 2020 anhand einer breit angelegten Patent- und Publikationsanalyse	Leichtbau BW GmbH
Technologiebericht „Nanotechnologie in den Sektoren Solarenergie und Energiespeicherung“	Analyse des Einflusses von Nanotechnologie auf die zukünftige Entwicklung von Produkten und Märkten der Solarenergie und Energiespeicherung	International Electrotechnical Commission (IEC)
Studie „Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge“	Szenarientwicklung und technisch-wirtschaftliche Analyse rund um die Frage, welchen Marktanteil Elektrofahrzeuge in Deutschland im Jahr 2020 haben werden, Darstellung von Hemmnissen und Treibern	acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE)
Studie „Energiespeicherung: Welche Marktdesigns und regulatorischen Anreize werden benötigt?“	Analyse des aktuellen Standes der Technik und der Potenziale von Energiespeicherung in der EU und Ableitung von Handlungsempfehlungen, welche Marktrahmenbedingungen und regulatorischen Änderungen weitere Kostensenkungen und eine breite Diffusion von Energiespeichertechnologien fördern könnten	Industry, Research and Energy Committee (ITRE) of the European Parliament

GLOSSAR

Adiabatische Druckluftspeicher

In einem Druckluftspeicher (siehe CAES) kann eine große Menge Strom indirekt effizient und sicher eingespeichert werden, indem in Zeiten von niedriger Stromnachfrage und/oder -preisen bei der Aufladung mit der einzuspeichernden elektrischen Energie ein Kompressor betrieben wird, der Luft aus der Atmosphäre komprimiert und in sogenannte „Kavernen“ bzw. zumeist unterirdische Hohlräume pumpt. In Zeiten von hoher Stromnachfrage und/oder -preisen wird bei der Entladung diese Druckluft verwendet, um z. B. eine Turbine anzutreiben und durch einen daran angeschlossenen Generator wieder elektrische Energie zu erzeugen. Adiabatisch im Sinne der Thermodynamik (Zustandsänderung eines Systems ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung) wird der Druckluftspeicher dann, wenn die bei der Kompression entstehende Wärme aufgefangen und in einem Wärmespeicher zwischengespeichert werden kann. Wird die Druckluft aus der Kaverne herausgelassen, entsteht wiederum Kälte, welche durch die Wärme aus dem Wärmespeicher ausgeglichen werden kann bzw. sogar muss, um die Turbinen nicht durch zu kalte Luftströme zu beschädigen. Umweltfreundlich ist der Einsatz eines Wärmespeichers deshalb, weil die Wärme bei der Aufladung sonst entweicht und die kalten Luftströme bei der Entladung üblicherweise mit der Verbrennung von Erdgas erwärmt werden.

Al-Luft

Aluminium-Luft-Batterien generieren Elektrizität durch die Reaktion von Sauerstoff aus der Umgebungsluft mit Aluminium bzw. der Reduktion von Sauerstoff an der Kathode und der Oxidation von Aluminium an der Anode. Die Batterietechnologie besitzt theoretisch eine deutlich höhere Energiedichte als Lithium-Ionen-Batterien, weist jedoch noch hohe Kosten (für das Aluminium) auf und ist schwierig zu handhaben. Aluminium-Luft-Batterien können mechanisch wiederaufgeladen werden.

Arbitrage

Arbitrage bzw. das Erzielen von risikolosen Gewinnen durch Ausnutzung von Preisunterschieden für gleiche Waren auf verschiedenen Märkten bei praktisch zeitgleichem Kauf und Verkauf kann dazu führen, dass sich die Preise in verschiedenen Märkten einander für gleiche Waren angleichen; ein Vorteil, der in der Regel allerdings nur eine bestimmte Zeit lang existiert. Arbitrage-Geschäfte werden durch Stromhändler getätigt und haben international im Stromhandel der Energiewirtschaft eine erhebliche Bedeutung. Auch in Deutschland hat die Anzahl von Arbitrageuren als Marktteilnehmern deutlich zugenommen. Ein Nachteil dieser Entwicklung kann sein, dass es zu Regelenergie-Engpässen kommt, wenn die Stromhändler das zur Verfügung stehende Reservoir an Regelenergie für Arbitrage-Geschäfte ausschöpfen und die Netzbetreiber zur Ausbalancierung des ver-

ursachten Defizits zwischen Ein- und Ausspeisung „Ausgleichsenergie“ aufwenden müssen. Im Regelfall ist diese Ausgleichsenergie aber deutlich teurer als der Preis für Regelenergie, weshalb kein Anreiz besteht, ihre Erzeugung in Anspruch zu nehmen.

BMBF

Bundesministerium für Bildung und Forschung. Im November 2015 geleitet von Bundesministerin Prof. Dr. Johanna Wanka (CDU).

BMVBS

Vormals Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, heute Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Im November 2015 geleitet von Alexander Dobrindt (CSU).

BZ

Die Brennstoffzelle repräsentiert einen Energiewandler und kann deshalb nicht für sich selbst stehen, wenn es um die stationäre Energiespeicherung geht: Das üblicherweise favorisierte System ist die sogenannte Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (engl. „proton exchange membrane fuel cell“, Abkürzung PEM-FC) als Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle, allerdings mit Stack (siehe Stack) und Wasserstoff-Tank. In dieser Aufstellung ist das System mitsamt seinen Eigenschaften näherungsweise vergleichbar mit den anderen Energiespeichertechnologien. Es gibt verschiedene weitere Typen von Brennstoffzellen.

CAES

Engl. „compressed air energy storage“, siehe Adiabatische Druckluftspeicher.

CO₂

Die Summenformel für Kohlenstoffdioxid, eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff. Kohlenstoffdioxid gilt als das wichtigste Treibhausgas, weil es für den durch die Menschheit verursachten Klimawandel verantwortlich gemacht wird und seine Emission deshalb zunehmend restriktiv eingeschränkt wird.

Dezentrale Energiespeicher

Das Hauptmerkmal einer dezentralen Stromerzeugung ist, dass Energie verbrauchernah erzeugt und auch dort gespeichert wird, im privaten und im industriellen Bereich. Das Konzept gilt als modern und nachhaltig, nicht benötigte Überschüsse können in das Stromnetz eingespeist werden. Im Vergleich zu zentralen Energiespeichern sind dezentrale Energiespeicher eher klein.

Druckluftspeicher

Siehe Adiabatische Druckluftspeicher.

EDLC

Engl. „electric double layer capacitor“, ein Doppelschichtkondensator (siehe Kondensator). Sie besitzen üblicherweise Kohlenstoffelektroden mit einer sehr hohen statischen Doppelschichtkapazität und einer geringen Pseudokapazität und werden gerne als Energiezwischenspeicher eingesetzt, weil sie für Anwendungen hoher Leistung im Sekundenbereich geeignet sind. Sie wurden zu Superkondensatoren weiterentwickelt, siehe Supercaps.

Elektrolyse

Unter einer Elektrolyse wird allgemein der Prozess verstanden, bei dem in einer Redoxreaktion elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt und chemische Verbindungen gespalten werden. In Bezug auf die vorliegende Roadmap gilt als Elektrolyse v.a. ein Vorgehen zur Gewinnung von Wasserstoff aus Wasser: Durch den Einsatz von elektrischer Energie wird das Wasser in den in der Natur nicht in Reinform vorkommenden Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Später kann die in den Einzelstoffen gespeicherte chemische Energie z. B. in einer Brennstoffzelle (siehe BZ) wieder in nutzbare elektrische Energie umgewandelt werden.

Elektrolyt

Als Elektrolyt z. B. in einer Batterie wird die feste, flüssige oder gelartige Trennschicht aus chemischen Substanzen zwischen den beiden Elektroden, der Anode und der Kathode, bezeichnet. Ein Elektrolyt kann Ionen aufnehmen, abgeben und leiten, weshalb er der chemischen Reaktion dient, indem er den internen Ionen-transport übernimmt und zum Ladungsausgleich Ionen generiert.

EU

Die Europäische Union umfasst im November 2015 28 europäische Staaten mit rund 500 Millionen Einwohnern.

FES

Engl. „flywheel energy storage“, siehe Schwungrad.

FhG

Die Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. ist mit knapp 24 000 Mitarbeitern (Stand: November 2015) die größte Organisation für angewandte Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen in Europa und betreibt mehr als 80 Forschungseinrichtungen in Deutschland, davon 66 Fraunhofer-Institute.

FuE

Abkürzung für Forschung und Entwicklung.

Gesamt-Roadmap

Eine Variante des allgemeinen Begriffs Roadmap, in der es darum geht, eine Technologie-Roadmap und eine Produkt-Roadmap so

zu integrieren, dass eine Lücke zwischen dem, was eine Technologie leistet (engl. „technology push“) und dem, was von einem Markt gefordert wird (engl. „market pull“) festzustellen ist und daraus entstehende Herausforderungen identifiziert werden können.

Gravimetrische Energie-/Leistungsdichte

Mit der physikalischen Größe der gravimetrischen Energie-/Leistungsdichte wird die Verteilung von Energie/Leistung (in Wh bzw. W) pro Masse eines Stoffes (in kg) bezeichnet. In diesem Sinne ist für Anwendungen wichtig, dass das Gewicht von potenziellen Energiespeichertechnologien im Vordergrund steht.

Grid parity

Die sogenannte Netzparität bezeichnet den Zeitpunkt, ab dem die Stromgestehungskosten pro erzeugter Kilowattstunde für aus Erneuerbaren Energien erzeugten Strom genau so hoch sind wie die Stromgestehungskosten pro erzeugter Kilowattstunde des herkömmlichen Stroms, der bei einem Netzbetreiber eingekauft wird. Unterschieden wird die Netzparität aus Sicht eines Endverbrauchers, der die Kosten des z. B. mit einer eigenen Solaranlage produzierten Stroms mit den Kosten des von einem Energieversorgungsunternehmen zu beziehenden Stroms vergleichen muss, und die Netzparität aus Sicht eines Stromkonzerns, der die Erwerbskosten für Strom aus Erneuerbaren Energien mit den Erzeugungs- oder Erwerbskosten herkömmlichen Stroms vergleicht.

GuD

Abkürzung für Gas und Dampf, z. B. im Zusammenhang eines Gas- und Dampf-Kombikraftwerks, kurz GuD-Kraftwerk.

GW

Abkürzung für Gigawatt.

GWh

Abkürzung für Gigawattstunde.

H₂

Die Summenformel für Wasserstoff, ein chemisches Element mit dem Symbol H.

HE bzw. HE-LIB

Die Hochenergie-Entwicklung setzt auf Batteriematerialien mit höherer spezifischer Energie ohne dabei die Zellspannung zu erhöhen. Entsprechende Batterietechnologien befinden sich heute in der FuE und werden in den kommenden Jahren als marktreif, insbesondere für den Einsatz in Elektrofahrzeugen erwartet.

HV bzw. HV-LIB

Mit dem Begriff der Hochvolt-Entwicklung wird ganz konkret auf die Batterietechnologien hingewiesen, die ausgehend vom Referenzsystem der 4 Volt-Lithium-Ionen-Batterie bis hin zu den 5 Volt-Lithium-Ionen-Batterien entwickelt werden. Damit einher geht der Bedarf von Hochvolt-Elektroden sowie passenden Elektrolytmaterialien.

Inselnetze

Inselnetze sind kleine autonome Stromnetze, die von einem übergeordneten Verbundnetz unabhängige, abgeschlossene Energieversorgungssysteme darstellen. Inselnetze bestehen oft nur aus einem oder wenigen Elektrizitätswerken und versorgen ein räumlich abgegrenztes Gebiet, z. B. eines oder mehrere beieinander liegende Krankenhäuser, abgelegene Dörfer oder eben Inseln per se, wo die öffentliche Stromversorgung nicht gewährleistet ist und ein erhöhter Bedarf von Versorgungssicherheit sowie Versorgungsqualität besteht. Die Energieversorgung wird auf herkömmliche Art mit Hilfe von durch fossile Brennstoffe angetriebenen Stromgeneratoren sichergestellt, und seit jüngerer Zeit auch durch den Einsatz von erneuerbaren Energien, wie z. B. Solar- oder Windenergieanlagen. Da Stromausfälle bei Inselnetzen häufig vorkommen können, stellen große Energiespeicher, die im Fall der Fälle temporär ein hohes Leistungsvolumen abgeben können, eine wichtige Komponente innerhalb des Stromnetzes zur Sicherstellung der Energieversorgung dar. Kleinere und autonome Stromversorgungsanlagen z. B. auf einer einzeln stehenden Gebirgshütte werden nicht als Inselnetze, sondern als Inselanlagen bezeichnet (siehe Off-Grid-Anwendungen).

kg

Abkürzung für Kilogramm.

km

Abkürzung für Kilometer.

KOH/H₂O

Die Summenformel für Kaliumhydroxid-Lösung, welche in Zink-Luft-Batterien als klassischer alkalischer Standard-Elektrolyt fungieren kann, siehe Zn-Luft.

Kondensator

Ein Kondensator ist ein Speichermedium, das elektrische Ladungen an den Oberflächen seiner beiden Elektroden speichert. Beim Anlegen einer Spannung wird der Kondensator aufgeladen. Die im elektrischen Feld gespeicherte Energie kann dann wieder in einen Strom umgewandelt werden. Weil die Energiedichte sehr gering ist, werden Kondensatoren nicht als ausschließlicher Energiespeicher für die Elektromobilität betrachtet.

kW

Abkürzung für Kilowatt.

kWh

Abkürzung für Kilowattstunde.

l

Abkürzung für Liter.

Latentwärme

Latentwärmespeicher sind Energiespeicher, deren Speichermedium durch Wärme eine Zustandsänderung erfährt und dadurch thermische Energie einspeichert. Latentwärmespeicher mit z. B. Paraffin werden vor allem dort eingesetzt, wo viel Wärme entsteht, verborgen (lat. „verborgen sein“) eingespeichert wird und zeitverzögert wieder zur Verfügung stehen soll. Die Energiespeicher gelten als sehr effizient, weil sie Wärme verlustarm über einen längeren Zeitraum hinweg einspeichern und nahezu beliebig oft neu aufgeladen werden können, ohne nennenswerte Kapazitätsverluste hinnehmen zu müssen. In der stationären Energiespeicherung finden sie ihren Einsatz z. B. beim Speichern der von Solarenergie-Anlagen erzeugten Wärme, die während des Sommers eingespeichert und während des Winters abgerufen werden kann.

LCOE

Engl. „levelized cost of energy“, Abkürzung für die Methode zur Berechnung der sogenannten Stromgestehungskosten bzw. zur Ermittlung einer Kostenvergleichsbasis von Kraftwerken unterschiedlicher Erzeugungs- und Kostenstruktur.¹⁷ Der Grundgedanke ist, aus allen anfallenden Kosten für Errichtung und Betrieb einer Anlage eine Annuität (jährliche Durchschnittskosten) zu bilden und diese der durchschnittlichen jährlichen Erzeugung gegenüberzustellen. Daraus ergeben sich dann die sogenannten Stromgestehungskosten in Euro pro Kilowattstunde. Es ist wichtig zu betonen, dass diese Methode eine Abstraktion von der Realität darstellt, mit dem Ziel, verschiedene Erzeugungsanlagen vergleichbar zu machen. Die Methode ist nicht geeignet, um die Wirtschaftlichkeit einer konkreten Anlage zu bestimmen. Dafür muss eine Finanzierungsrechnung unter Berücksichtigung aller Einnahmen und Ausgaben auf Basis eines Cashflow-Modells durchgeführt werden.

LFP

Engl. „lithium iron phosphate“, Abkürzung für Lithium-Eisenphosphat mit der Summenformel LiFePO₄, ein Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien. Batteriezellen mit dieser Kathode sowie einer Anode aus Graphit bieten zwar eine geringere Energiedichte als Batterien auf Basis des herkömmlichen Kathodenmaterials Lithium-Kobaltdioxid mit der Summenformel LiCoO₂.

Weil sie aber eine längere Lebenszeit und höhere Leistungsdichte sowie eine verbesserte Sicherheit aufweisen, bieten sie auch Vorteile für den Einsatz in der stationären Energiespeicherung.

LIB

Abkürzung für das elektrochemische Energiespeicherkonzept der sogenannten Lithium-Ionen-Batterie.

LIB 2015

Die Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“ wurde 2007 gegründet. Sie setzte sich zusammen aus rund 60 Projektpartnern aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, deren gemeinsames Ziel es war, für Fortschritt in der Forschung und Entwicklung von effizienten Lithium-Ionen-Batterien zu sorgen. Die Fördermaßnahme ist abgeschlossen.

Li-Feststoff

Lithium-Feststoff-Batterien besitzen feste Elektrolytmaterialien, welche unter anderem eine schnelle Energieaufnahme bei hoher Hitzebeständigkeit ermöglichen. Damit erspart die Lithium-Feststoff-Batterie aufwändige Kühlmechanismen und reduziert damit den Platzbedarf bei gleicher oder höherer Leistung im Vergleich mit anderen Batterietechnologien. Sie ist außerdem deutlich sicherer als heutige Lithium-Ionen-Batterien.

Li-Luft

In der Lithium-Luft-Batterie wird die Kathode durch Luft ersetzt, die Anode besteht aus Lithium. Weil dieses vollständig umgesetzt werden und der für die Reaktion benötigte Sauerstoff aus der Umgebungsluft kommen kann, entscheidet allein die Größe der Anode über die Kapazität der Batterie-Zelle. Aus diesem Grund liegt zumindest die theoretisch erreichbare Energiedichte über der aller anderen Batterietechnologien. Allerdings steht noch offen, ob und v. a. wann Lithium-Luft-Batterien als wiederaufladbare Systeme für den Einsatz in der stationären Energiespeicherung realisiert werden können.

Li-Polymer

Steht für Lithium-Polymer-Akkumulatoren und damit eine Weiterentwicklung des Lithium-Ionen-Akkumulators, in der die Elektroden aus Graphit und Lithium-Metalloxid bestehen. Die Besonderheit besteht im nicht flüssigen Elektrolyten auf Polymer-Basis, welcher als feste bis gelartige Folie eingebaut wird.

Li-S

Lithium-Schwefel-Akkumulatoren funktionieren ähnlich wie Natrium-Schwefel-Batterien, siehe NaS, wobei Lithium das Natrium substituiert. Sie sind jedoch keine Hochtemperaturbatterien. Lithium-Schwefel-Akkumulatoren besitzen eine Anode aus Lithium und eine Kathode aus Schwefel sowie Kohlenstoff, was eine sehr hohe Energiedichte ermöglicht. Während der Ent-

ladung reagiert Lithium von der Anode mit Schwefel, während der Aufladung wird die entstandene Verbindung wieder gelöst.

Load shifting

Der engl. Begriff „load shifting“ beschreibt die Lastverschiebung im Strommarkt durch eine Verlagerung der Lastnachfrage von Hochlastzeiten auf Niedriglastzeiten. Ziel des „load shifting“ ist vor allem eine effiziente Energienutzung hinsichtlich der zur Energieerzeugung zur Verfügung stehenden Kapazität und die Reduktion von CO₂-Emissionen verursacht durch den kurzfristig anberaumten Einsatz von z. B. Kohlekraftwerken zur Abdeckung der Spitzenlast. Sollte die Spitzenlastverschiebung gemeint sein, siehe Peak Load Shifting.

LTO

Engl. „lithium titanium oxide“, Abkürzung von Lithium-Titanoxid oder Lithium-Titanat mit der Summenformel Li₄Ti₅O₁₂, das ein vielversprechendes Anodenmaterial für bestimmte Nischenanwendungen darstellt, welche eine hohe Zyklenfestigkeit und eine lange kalendarische Lebensdauer benötigen. LTO-basierte Batteriezellen haben eine geringere Zellspannung, was ihre Sicherheit erhöht. Die Batterien sind schnell aufladbar und können dank ihrer chemischen Stabilität in einer größeren Temperatur-Bandbreite betrieben werden. Ihre Energiedichte ist niedriger als bei anderen Lithium-Ionen-Batterien, ihre Leistungsdichte je nach Kathodenmaterial auch besser. Als weiterer Nachteil gelten die materialbedingt hohen Kosten.

Mg-Luft

Magnesium-Luft-Batterien generieren Elektrizität durch die Reaktion von Sauerstoff in der Umgebungsluft mit Magnesium bzw. der Reduktion von Sauerstoff an der Kathode und der Oxidation von Magnesium an der Anode. Die Batterietechnologie besitzt theoretisch eine deutlich höhere Energiedichte als Lithium-Ionen-Batterien. Es steht allerdings noch offen, ob Magnesium-Luft-Zellen als elektrisch wiederaufladbare Batterien realisiert werden können.

Microgrid

Als Bestandteil eines Smart Grid sind sogenannte Microgrids bzw. synonym auch virtuelle Kraftwerke regionale, in sich geschlossene und damit stromnetzunabhängige Verteilnetze.¹⁸ Dezentrale Anlagen zur Energieerzeugung speisen elektrische Energie in das relativ kompakte Microgrid ein, die in Energiespeichern zwischengespeichert oder direkt von Energieverbrauchern genutzt wird. Mit dem Einsatz stationärer Energiespeicher wird auch Versorgungssicherheit und Preisstabilität gewährleistet. Die Microgrids und ihr übergeordnetes Smart Grid können elektrische Energie austauschen, je nachdem, wie sich Angebot und Nachfrage bzw. die Strompreise auf beiden Netzebenen entwickeln.

MW

Abkürzung für Megawatt.

MWh

Abkürzung für Megawattstunde.

NaNiCl₂

Eine Natrium-Nickelchlorid-Zelle wird in der Regel auch als ZEBRA-Batterie bezeichnet und ist ein wiederaufladbarer Akkumulator. Ein fester Elektrolyt wird durch eine Kombination aus flüssigen und festen Elektroden ergänzt. Die Anode im durch einen Separator abgetrennten Außenbereich der Batterie besteht aus flüssigem Natrium, die Kathode aus Natriumchlorid bzw. mit einer flüssigen Salzlösung aus Nickelchlorid und Natriumchlorid-durchtränktem, gesintertem Nickel. Die Notwendigkeit zur Aufrechterhaltung der hohen Betriebstemperatur erzwingt den Einsatz einer Heizung zusätzlich zur thermischen Isolation, da sich die Zelle sonst stetig entlädt.

NaS

Natrium-Schwefel-Akkumulatoren, in denen Elektroden aus ebenen genannten Elementen zum Einsatz kommen und als fester Elektrolyt eine Natriumionen leitende Keramik verwendet wird.

NCA

Engl. „nickel cobalt aluminium (oxide)“, Abkürz. für Nickel-Kobalt-aluminium(-oxid) mit der Summenformel $\text{Li}(\text{Ni}_{0,85}\text{Co}_{0,1}\text{Al}_{0,05})\text{O}_2$ ist ein Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien. Vorteile dieses Materials bestehen in der relativ hohen Lebensdauer, der spezifischen Energie und der spezifischen Leistung, als Nachteile sind relativ hohe Kosten und ein erhöhtes Sicherheitsrisiko zu nennen.

Netzdienstleistungen

Unter Netzdienstleistungen bzw. synonym auch Systemdienstleistungen versteht man üblicherweise technische Dienstleistungen wie z. B. Betriebsführung, Instandhaltung oder Störungsbeseitigung an leitungsgebundenen Versorgungsinfrastrukturen wie Strom-, Gas-, Wasser-/Abwasser- und Fernwärmenetzen. Deren Bereitstellung obliegt den Stromnetzbetreibern und dient der Stabilisierung der Stromversorgung.¹⁹ Dazu zählen insbesondere die Frequenzhaltung, Spannungshaltung, der Versorgungswiederaufbau. Die Systemdienstleistungen werden heute häufig durch konventionelle Kraftwerke bereit gestellt. In Zukunft werden auch stationäre Energiespeicher zur Bereitstellung von Systemleistungen eingesetzt.

NiCd

Nickel-Cadmium-Akkumulatoren, in denen Elektroden aus ebenen genannten Elementen zum Einsatz kommen und als flüssiger Elektrolyt eine Kaliumhydroxid-Lösung verwendet wird.

Nicht-zyklische Energiespeicher

Bezeichnet die Gruppe der Energiespeicher, welche nicht in regelmäßig wiederkehrenden Rhythmen aufgeladen und entladen werden. Ihre Betriebslebensdauer und die Zyklenbeständigkeit müssen nicht so hoch sein wie bei zyklischen Energiespeichern (siehe Zyklische Energiespeicher), dafür aber die kalendarische Lebensdauer.

NiMH

Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren, in denen Elektroden aus Nickeloxidhydroxid und einer Wasserstoffspeicherlegierung aus Nickel und sogenanntem Mischmetall mit Seltenerdelementen zum Einsatz kommen und als Elektrolyt eine Kaliumhydroxid-Lösung verwendet wird. Ihre wichtigste Anwendung stellen Hybrid-Elektrofahrzeuge dar.

NMC

Engl. „lithium nickel manganese cobalt oxide“, Abkürzung für Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid mit der Summenformel $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ bezeichnet ein ganzes Stoffsystem. Batterien auf Basis dieses Kathodenmaterials vereinen mehrere Vorteile anderer Batterietechnologien auf sich: Die hohe Kapazität von Lithium-Kobaltoxid, die gute Hochstromfähigkeit von Lithium-Nickeloxid und die Überladestabilität sowie den Preisvorteil von Lithium-Manganoxid. Sie bieten außerdem eine hohe mittlere Entladespannung und können relativ schnell geladen werden.

Notstromversorgung

Bei der Notstromversorgung wird grundsätzlich zwischen der sogenannten Unterbrechungsfreien Stromversorgung (siehe USV) und Netzersatzanlagen (NEA) unterschieden.²⁰ Letztere bestehen in der Regel aus Generatoren, die von Dieselmotoren angetrieben werden. Sie werden zur Versorgung des Stromnetzes/Notstromnetzes der jeweiligen Liegenschaft eingesetzt. Die Übernahme der Netzversorgung erfolgt nicht unterbrechungsfrei; d. h. im günstigsten Fall liegt die Anlaufzeit der Netzersatzanlage im Sekundenbereich. Die Betriebsdauer der Netzersatzanlage ist in hohem Maße abhängig von einer unterbrechungsfreien Versorgung mit qualitativ einwandfreiem Kraftstoff. Alternativ hierzu werden auch Brennstoffzellen als Netzersatzanlagen angeboten (siehe BZ). Der Wasserstoff kann dazu in zusammengeschalteten „Flaschenbatterien“ gelagert werden, der Sauerstoff wird der Umluft entnommen. Die Betriebsdauer hängt hier von der Versorgung mit Wasserstoff ab.

Das Notstromnetz ist ein Teil des gesamten Stromnetzes einer Liegenschaft mit separat geführten und abgesicherten Stromkreisen. Um einen Zusammenbruch der Notstromversorgung zu vermeiden, muss sichergestellt werden, dass nur diejenigen Verbraucher an die Notstromversorgung angeschlossen sind, die für den definierten Notbetrieb der Einrichtung festgelegt wurden.

Der sichere und stabile Betrieb der Notstromversorgung (USV/NEA) setzt voraus, dass der Energiebedarf der angeschlossenen Verbraucher die Leistungsfähigkeit der Notstromversorgung nicht überschreitet. Vor einer Erhöhung der Last durch zusätzliche oder andere Verbraucher ist die Leistungsfähigkeit der Notstromversorgung zu überprüfen und ggf. anzupassen. Falls für bestimmte Aufgaben Hochverfügbarkeitsanforderungen bestehen (z. B. Lagezentrum, Rechenzentrum) oder einzelne Bereiche der Einrichtung als besonders kritisch identifiziert wurden, sind entsprechende Redundanzen der Notstromversorgung erforderlich. Im Übrigen lassen sich Risiken einer lokalen Störung bzw. Unterbrechung der Stromeinspeisung aus dem öffentlichen Netz durch eine zweite, örtlich getrennte Energieeinspeisung (wenn möglich eines zweiten Energieversorgungsunternehmens) deutlich minimieren.

NPE

Abkürzung für Nationale Plattform Elektromobilität. Ein Expertengremium, welches die deutsche Bundesregierung seit Mai 2010 berät und Empfehlungen zur Verwirklichung von Elektromobilität in Deutschland ausspricht. Setzt sich zusammen aus Vertretern der Gewerkschaften, Industrie, Politik, Verbänden und Wissenschaft.

Off-Grid-Anwendungen

Off-Grid-Anwendungen bzw. Off-Grid-Systeme werden oft synonym als Inselanlagen bezeichnet, die sich von Inselnetzen allerdings durch ihren Umfang unterscheiden (siehe Inselnetze). Sie sind nicht an ein ggf. landesweites, öffentliches Stromnetz angeschlossen bzw. werden v.a. dort eingesetzt, wo der Anschluss an das jeweils übergeordnete Stromnetz nicht möglich oder nicht wirtschaftlich ist. Off-Grid-Anwendungen funktionieren daher nur mit einem (oder mehreren) dem Bedarf entsprechend dimensionierten Energiespeichern.

Pb

Blei-Säure-Akkumulatoren mit Elektroden aus Blei und Bleidioxid sowie einem Elektrolyten aus verdünnter Schwefelsäure.

Peak Load Shifting

Unter der sogenannten Spitzenlastverschiebung wird die Lastverschiebung im Strommarkt zu einem Zeitpunkt der Spitzenlast verstanden, also wenn die Lastnachfrage auf dem Höchstniveau (engl. „peak“) angekommen ist. Ziel des „Peak Load Shifting“ ist v.a. eine effiziente Energienutzung hinsichtlich der zur Energieerzeugung zur Verfügung stehenden Kapazität und die Reduktion von CO₂-Emissionen verursacht durch den kurzfristig anberaumten Einsatz von z. B. Kohlekraftwerken zur Abdeckung der Spitzenlast. Sollte die Lastverschiebung zu Hochlastzeiten gemeint sein, siehe Load shifting.

Peak Shaving

Durch den Einsatz von großen Energiespeichersystemen sollen die Spitzen der Lastnachfrage aus Erzeugungsperspektive ver gleichmäßig werden (engl. „shaving“). Die Energiespeicher werden dann aufgeladen, wenn die Energieversorgung auf relativ niedrigem Niveau erfolgt und die Kosten für zusätzliche Energieerzeugung gering sind, also v.a. in der Nacht. Wenn die Lastnachfrage dann wieder ansteigt und die Energienutzungspreise wieder höher liegen, werden die Energiespeicher entladen und das Stromnetz bzw. die Erzeugungskapazität kann entlastet werden. Die erzielte Preisdifferenz abzüglich der Speicherverluste und der variablen Betriebskosten stellt die Gewinnmarge des Energiespeicher-betreibenden Unternehmens dar, aus der auch die Investitionen refinanziert werden können.²¹ In diesem Beispiel entspricht „Peak Shaving“ dem „Peak Load Shifting“.

PEM-FC

Engl. „proton exchange membrane fuel cell“.

PHES

Engl. „pumped hydro energy storage“, siehe Pumpspeicher.

Primärregelleistung

Siehe Regelleistung.

Produkt-Roadmap

Eine Variante des allgemeinen Begriffs Roadmap, in der es darum geht, die Entwicklung der Marktanforderungen z. B. an eine bestimmte Technologie zu dokumentieren.

Pumpspeicher

Große, zentrale Pumpspeicher werden für die Speicherung und Erzeugung elektrischer Energie eingesetzt: In Zeiten von niedriger Stromnachfrage und/oder -preisen wird Wasser von einem niedriger liegenden Reservoir in ein höher liegendes Reservoir gepumpt. In Zeiten von hoher Stromnachfrage und/oder -preisen wird das Wasser dann wieder abgelassen, um über Turbinen und daran angeschlossene Generatoren Strom zu erzeugen und zu verkaufen. Pumpspeicher können somit sowohl positive als auch negative Regelleistung (siehe Regelleistung) herstellen und besitzen die Fähigkeit zum Schwarzstart (siehe Schwarzstart). Aus diesen Gründen spielen sie für die Versorgungssicherheit und Netzstabilität eine wichtige Rolle, insbesondere im Zuge der Energiewende und der zunehmenden Einbindung fluktuierender erneuerbarer Energien. Weil sie außerdem keine CO₂-Emissionen aufweisen, sind sie deutlich umweltfreundlicher als z. B. die alternativ eingesetzten Kohlekraftwerke.

PV

Abkürzung für Photovoltaik.

Quartierspeicher

Quartierspeicher nehmen in Zeiten von niedriger Stromnachfrage und/oder -preisen zu viel produzierten Strom aus lokalen Stromerzeugungsanlagen auf. In Zeiten von hoher Stromnachfrage und/oder -preisen können die angeschlossenen Haushalte und Gewerbebetriebe ihren gespeicherten Strom wieder selbst verbrauchen.

Regelleistung

Mit Regelleistung bzw. synonym auch Regelenergie genannt bezeichnet man die Energie, die ein Netzbetreiber benötigt, um unvorhergesehene Leistungsschwankungen in seinem Stromnetz auszugleichen.²² Es wird zwischen positiver und negativer Regelenergie unterschieden: Übersteigt die ins Netz eingespeiste Energie die zum selben Zeitpunkt entnommene Energie, liegt ein Leistungsüberschuss im Netz vor. In diesem Fall benötigt der Netzbetreiber negative Regelenergie durch Stromabnehmer, welche kurzfristig dem Netz Strom entziehen. Bei nicht prognostizierter, erhöhter Stromnachfrage ist positive Regelenergie erforderlich. Der Netzbetreiber benötigt in diesem Fall kurzfristig Einspeisungen in sein Netz. Die Regelleistung bzw. synonym auch die Regelenergie ermöglicht es den Netzbetreibern, auf unvorhergesehene Leistungsschwankungen im Stromnetz flexibel zu reagieren und Änderungen der Stromnetz nachfrage ausgleichen zu können.

Für den Ausgleich von Leistungsungleichgewichten sind die Übertragungsnetzbetreiber 50 Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, EnBW Transportnetze GmbH und TenneT TSO GmbH für ihre jeweiligen Regelzonen verantwortlich. Den Übertragungsnetzbetreibern stehen die drei Regelenergiequalitäten Primärregelenergie; Sekundärregelenergie und Minutenreserve zur Verfügung. Primärregelenergie wird zur schnellen Stabilisierung des Netzes innerhalb von 30 Sekunden benötigt. Die Sekundärregelenergie muss innerhalb von fünf Minuten in voller Höhe zur Verfügung stehen. Minutenreserve wird zur Ablösung der Sekundärregelenergie eingesetzt, ist mit einer Vorlaufzeit von bis hinunter zu 7,5 Minuten zur Erbringen und wird mindestens 15 Minuten lang in konstanter Höhe abgerufen.

RFB

Abkürzung für Redox-Flow-Batterie, ein Akkumulatorenkonzept, welches auf der Reduktion und Oxidation von umgepumpten Elektrolytlösungen aus Vorrattanks an einem brennstoffzellartigen Stack basiert. Die Vanadium-basierte Redox-Flow-Batterietechnologie (siehe VRFB) ist eine Variante der Redox-Flow-Batterie.

Roadmap

Unter einer Roadmap wird im Allgemeinen ein vorbereitender Projektplan verstanden, in dem noch auszuführende Schritte ggf. bis weit in die Zukunft verortet werden. Es gibt verschiedene Typen von Roadmaps, z. B. die Produkt-Roadmap oder die Technologie-Roadmap. Allen Roadmaps ist gemein, dass durch ihre Erstellung Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Schritten und damit Risiken und Unsicherheiten aufgedeckt werden können.

Schwarzstart

Bei einem Schwarzstart wird ein Kraftwerk unabhängig vom Stromnetz angefahren. Weil die dafür notwendige Energie weder aus dem Kraftwerk selbst noch aus dem Stromnetz kommen kann, empfiehlt sich dafür die Nutzung großer stationärer Energiespeicher auf elektrochemischer Basis.

Schwungrad

Ein Schwungrad bzw. synonym oft auch „Schwungmasse“ speichert elektrische Energie als kinetische Bewegungsenergie durch eine Drehbewegung mit kaum Reibungsverlust. Wird die Geschwindigkeit der Umdrehungen gedrosselt, kann elektrische Energie entnommen werden, soll elektrische Energie eingespeichert werden, erhöht sich die Umdrehungsgeschwindigkeit. Schwungräder werden eingesetzt, um bei Bedarf bzw. falls Leistungsschwankungen im Stromnetz auftreten, schnell Energie abzugeben oder auch aufzunehmen.

SMES

Engl. „superconducting magnetic energy storage“ bezeichnet Supraleitende Magnetische Energiespeicher. Zur Aufladung und Entladung benutzt ein Energieaufbereitungssystem einen Wechsel- bzw. Gleichrichter, um den einzuspeichernden Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln, der in einem SMES gespeichert werden kann. Der Gleichstrom erzeugt in einer supraleitenden Spule ein Magnetfeld, dessen magnetische Energie über lange Zeit annähernd verlustfrei gespeichert werden kann. Der SMES bedarf Kühlung, damit die Supraleitung der Spule aufrechterhalten wird. Bei jedem Stromwandlungsvorgang gehen etwa zwei bis drei Prozent der Energie in Form von Wärme verloren. Dazu kommt der Energieaufwand für die Kühlung und hohe Kosten von Supraleitern, weshalb SMES vor allem zur kurzzeitigen Speicherung von Energie verwendet werden.

SNG

Engl. „synthetic natural gas“, siehe Synthetisches Erdgas.

SOFC

Engl. „solid oxide fuel cell“, die Festoxidbrennstoffzelle bzw. eine Hoch-Temperatur-Brennstoffzelle.

Stack

Die in einer einzelnen Brennstoffzelle (siehe BZ) erzeugte Spannung ist relativ gering. Um die Spannung für den Betrieb in mobilen oder stationären Anwendungen zu erhöhen, werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet und bilden so einen Brennstoffzellen-Stapel, den so genannten Stack.

Supercaps

Sogenannte Superkondensatoren sind elektrochemische Kondensatoren (siehe Kondensator), welche auf das Dielektrikum im herkömmlichen Sinne verzichten. Ihre vielfach höheren Kapazitätswerte ergeben sich aus der Summe der statischen Speicherung elektrischer Energie (die sogenannte Doppelschichtkapazität) und der elektrochemischen Speicherung elektrischer Energie (die sogenannte Pseudokapazität).

Synthetisches Erdgas

Synthetisches Erdgas ist ein Substitut für natürliches Erdgas und wird künstlich hergestellt. Um Erdgas vollständig ersetzen zu können, muss es ihm allerdings in seinen Eigenschaften weitgehend entsprechen. Zur Herstellung gibt es mehrere Verfahren: Aus einer Kohlevergasung kann Synthesegas und schließlich Methan hergestellt werden, Wasserstoff durch Elektrolyse hergestellt und anschließend durch eine Methanisierung in Methan umgewandelt werden, Biomasse kann zu Biogas umgewandelt und schließlich zu Biomethan aufbereitet werden. Insbesondere das zweite Verfahren mittels einer Elektrolyse von Wasserstoff ist vielversprechend, weil so angesichts des zunehmenden Ausbaus fluktuierender erneuerbaren Energien in Zeiten von niedriger Stromnachfrage und/oder -preisen die Aufladung eines „Power-to-Gas“-Energiespeichers denkbar ist.²³ In Zeiten von hoher Stromnachfrage und/oder -preisen könnte das Gas wieder in elektrische Energie bzw. Strom umgewandelt werden.

T

Abkürzung für Temperatur.

TAB

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag berät als selbständige wissenschaftliche Einrichtung den Deutschen Bundestag und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels.

Technologie-Roadmap

Eine Variante des allgemeinen Begriffs Roadmap, in der es darum geht, den technologischen Fortschritt zu dokumentieren.

USV

Abkürzung für Unterbrechungsfreie Stromversorgung. USV beziehen ihre Energie aus Akkumulatoren und werden zum Schutz hochsensibler technischer Systeme wie Großrechner, Server und Telefonanlagen eingesetzt.²⁴ Sie gewährleisten beim Ausfall, bei Unter- oder Überspannung der öffentlichen Stromversorgung einen unterbrechungsfreien Betrieb. USV-Anlagen sind in der Regel nur für eine kurze Überbrückungszeit dimensioniert. In dieser Zeit können technische Systeme in einen sicheren Betriebszustand zurückgefahren werden, oder eine Netzersatzanlage kann die weitere Stromversorgung übernehmen. In der Notstromversorgung wird grundsätzlich zwischen der sogenannten Unterbrechungsfreien Stromversorgung und Netzersatzanlagen (NEA) unterschieden (siehe Notstromversorgung).

V

Abkürzung für Volt.

Volumetrische Energie-/Leistungsdichte

Mit der physikalischen Größe der volumetrischen Energie-/Leistungsdichte wird die Verteilung von Energie/Leistung (in Wh bzw. W) pro Raumvolumen eines Stoffes (in l) bezeichnet. In diesem Sinne ist für Anwendungen wichtig, dass die Größe von potenziellen Energiespeichertechnologien im Vordergrund steht.

VRFB

Die Vanadium-basierte Redox-Flow-Batterietechnologie ist eine Variante der Redox-Flow-Batterie (siehe RFB). Das Verfahren der Vanadium-Redox-Flow-Batterie nutzt jedoch Vanadium-Ionen in verschiedenen Oxidationszuständen, um chemische Energie in Form von gelösten Redox-Paaren in verschiedenen Tanks zu speichern. Die Stromwandlung erfolgt in einem getrennten Leistungsmodul, und den Elektroden wird während der Entladung kontinuierlich der umzusetzende Stoff aus den Vorrattanks zugeführt bzw. das entstehende Produkt in die gleichen Vorrattanks zurückgeführt. Die Speicherkapazität wird im Wesentlichen von der Größe der Speichertanks bestimmt, und der Wirkungsgrad liegt bei über 75 Prozent. Redox-Flow-Batterien haben eine vergleichbare Energiedichte wie Blei-Akkumulatoren (siehe Pb), ihre Lebensdauer ist jedoch fast zehn Mal so hoch.

W

Bei Watt (W) handelt es sich um die physikalische Einheit, welche Energie pro Zeit angibt und somit zur Beschreibung einer Leistung genutzt wird.

Wh

Die Wattstunde (Wh) ist eine physikalische Einheit und dient als Maß für verrichtete Arbeit. Eine Wh ist die Energie, welche ein Energiewandler mit einer Leistung von einem Watt in einer Stunde aufnimmt oder abgibt (siehe W).

xEV

Ein als Sammelbegriff bzw. -kürzel für alle (batterie-)elektrisch angetriebenen Fahrzeugkonzepte (Elektrofahrzeuge, engl. „electric vehicle“ bzw. EV) gebräuchter Term, insbesondere hybrid-elektrische Fahrzeuge (engl. „hybrid electric vehicle“ bzw. HEV), Plug-in-hybridelektrische Fahrzeuge (engl. „plug-in hybrid electric vehicle“ bzw. PHEV) und rein batterieelektrische Fahrzeuge (engl. „battery electric vehicle“ bzw. BEV).

ZEBRA

Siehe NaNiCl_2

Zentrale Energiespeicher

In diesem Fall erfolgt die Stromerzeugung zentral, z. B. in Kraftwerken aller Art, und der elektrische Strom wird dann an die dezentralen Verbraucher verteilt. Zentrale Energiespeicher sind gerne um ein Vielfaches größer als dezentrale Energiespeicher, weil sie mehr Energie speichern können müssen, falls gerade keine Nachfrage danach herrscht.

Zn/Br-RFB

Die Zink-Brom-RFB ist der Hauptvertreter der Spezialform Hybrid-Flow-Batterien.²⁵ Diese unterscheiden sich von den konventionellen RFB (siehe RFB) durch die Tatsache, dass eines der Redox-Paare nicht vollständig löslich ist. Bei der Zink-Brom-RFB liegt Zink in geladenem Zustand in fester Form abgeschieden als Metallschicht an der negativen Elektrode vor. Die Trennung von Energie- und Leistungsdichte ist bei diesem Konzept somit nicht vollständig gegeben, da die Energiedichte auch vom Volumen der gebildeten Zink-Schicht abhängt. Auch aufgrund der kompakten Metallelektrode ergeben sich relativ hohe Energiedichten, allerdings ist die Verwendung von Brom aufgrund seiner Toxizität nicht unproblematisch. Die Verwendung von Komplexbildnern kann diese Problematik lindern. Weitere Probleme, die bei diesem Batteriesystem auftreten, sind kurze Lebensdauern, geringe Energiewirkungsgrade von ungefähr 70 Prozent und die Bildung von Zink-Dendriten. Diese können zur Verstopfung der Kanäle und zu Kurzschlussbildung führen, und der Wirkungsgrad sinkt.

Zn-Luft

Die Zink-Luft-Batterie gibt es im Moment nur als Primärzelle, d. h., sie kann nur entladen werden. Mit einer Anode aus Zink und der an der Kathode umgesetzten Umgebungsluft lassen sich hohe Energiedichten bei allerdings recht geringer Ruhespannung realisieren, weshalb Zink-Luft-Batterien bisher v. a. für den Konsumerbereich bzw. für Hörgeräte relevant waren.

Zyklenfestigkeit

Die Aufladung und Entladung einer Batterie wird als ein Zyklus definiert. Je zyklenfester eine Batterie ist, desto häufiger kann dieser Vorgang ohne spürbaren Verlust an Speicherleistung ablaufen bzw. so häufig, bis die Batteriekapazität einen gewissen, vorgegebenen Wert unterschreitet. Für die Zyklenfestigkeit spielt allerdings nicht nur die konkret eingesetzte Batterietechnologie eine Rolle, sondern auch die Entladungstiefe vom ersten Zyklus an, also ob die Batterie vollständig oder nur teilweise entladen wurde – genau so wie die Frage, ob sie vollständig oder nur teilweise aufgeladen wurde. Die zyklische Lebensdauer einer Batterie ist sehr stark abhängig von ihrer Zyklenfestigkeit.

Zyklische Energiespeicher

Bezeichnet die Gruppe der Energiespeicher, welche in regelmäßig wiederkehrenden Rhythmen aufgeladen und entladen werden. Ihre Betriebslebensdauer und die Zyklenbeständigkeit müssen hoch sein, damit möglichst viele Ladezyklen voll durchlaufen werden können. Auch die kalendarische Lebensdauer sollte wie bei nicht-zyklischen Energiespeichern (siehe Nicht-zyklische Energiespeicher) hoch sein.

QUELLEN

- ¹ International Electrotechnical Commission (IEC, 2011): IEC White Paper Electrical Energy Storage. Online-Ressource, Link: <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWPenergystorage-LR-en.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.11.2015
- ² International Energy Agency (IEA, 2015): Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource, Link: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.11.2015
- ³ Wietschel et al. (2015): Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Seite 245ff.
- ⁴ Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH (FAZ, 2015): Kraftwerk mit Brennstoffzellen – Kompakt, leise und vibrationsfrei. Online-Ressource, Link: <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/umwelt-technik/kraftwerk-mit-brennstoffzellen-kompakt-leise-und-vibrationsfrei-13512552.html?printPagedArticle=true>, zuletzt abgerufen am 19.11.2015
- ⁵ Frankfurt Allgemeine Zeitung GmbH (FAZ, 2014): Neue Technologie für Energiespeicher – Träume von der Riesenbatterie. Online-Ressource, Link: http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/neue-technologie-fuer-energiespeicher-traeume-von-der-riesenbatterie-12970596.html?printPagedArticle=true#pageIndex_2, zuletzt abgerufen am 19.11.2015
- ⁶ Patentierte z. B. von der Gravity Power GmbH, wo ein sogenanntes „Gravity Power Modul“ hydraulisch einen massiven Kolben in einem tiefen vertikalen Schacht hebt, um Energie zu speichern. Für die Entladung senkt sich der Kolben durch sein Eigengewicht und Wasser wird in eine Turbine mit angeschlossenenem Stromgenerator gedrückt.
- ⁷ Wietschel et al. (2015): Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Seite 245ff.
- ⁸ Fraunhofer-Gesellschaft (FhG, 2013): Hannover Messe 2013 – Durchbruch für neuartige Stromspeicher: Große und leistungsfähige Redox-Flow-Batterie. Online-Ressource, Link: <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2013/Maerz/Durchbruch-fuer-neuartige-Stromspeicher-Redox-Flow.html>, zuletzt abgerufen am 19.11.2015
- ⁹ International Renewable Energy Agency (IRENA, 2013): Renewable Power Generation Costs in 2012: An Overview. Online-Ressource, Link: http://costing.irena.org/media/2769/Overview_Renewable-Power-Generation-Costs-in-2012.pdf, zuletzt abgerufen am 19.11.2015
- ¹⁰ LCOE-Berechnungen können unterschiedlich erfolgen und unterschiedliche Parameter einbeziehen. Studien können daher je nach Annahme bzgl. Kosten der Technologien, Zeitpunkt der Annahmen etc. variieren.
- ¹¹ Zakeri et al. (2015): Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. Elsevier B. V., Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 42, Februar 2015, Pages 569–596
- ¹² Schnell (2015): Status quo und Entwicklung stationärer Energiespeichertechnologien (Arbeitstitel). Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Seite 44ff.
- ¹³ Battke et al. (2013): A review and probabilistic model of life-cycle costs of stationary batteries in multiple applications. Elsevier B. V., Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 25, September 2013, Pages 240–250
- ¹⁴ Fraunhofer UMSICHT/Fraunhofer IWES (2014): Abschlussbericht Metastudie „Energiespeicher“ – Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online-Ressource, Link: <http://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/pressemitteilungen/2015/Abschlussbericht-Metastudie-Energiespeicher.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.11.2015
- ¹⁵ Battke et al. (2013): A review and probabilistic model of life-cycle costs of stationary batteries in multiple applications. Elsevier B. V., Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 25, September 2013, Pages 240–250
- ¹⁶ International Electrotechnical Commission (IEC, 2011): IEC White Paper Electrical Energy Storage. Online-Ressource, Link: <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.11.2015
- ¹⁷ Fraunhofer ISE (2013): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien – Studie. Online-Ressource, Link: <https://ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.11.2015

¹⁸ Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (2014): Erneuerbare Energien – Microgrids als Chance für Energiespeicher-Anbieter. Online-Ressource, Link: <http://www.springerprofessional.de/microgrids-als-chance-fuer-energiespeicher-anbieter/4938002.html>, zuletzt abgerufen am 30.11.2015

¹⁹ Deutsche Energie-Agentur (dena, 2015): dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien (Endbericht). Online-Ressource, Link: http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Projekte/Energiesysteme/Dokumente/dena-Studie_Systemdienstleistungen_2030.pdf, zuletzt abgerufen am 19.11.2015

²⁰ Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK, 2015): Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden. Online-Ressource, Link: https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis_Bevoelkerungsschutz/Band_13_Notstromversorgung.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt abgerufen am 19.11.2015

²¹ Höfling, International Renewable Energy Storage Conference (IRES, 2010): Energiespeicherung – Herausforderungen bei der Bestimmung des Bedarfs und der Förderung. Online-Ressource, Link: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/06_Hintergrundinformationen/2011_01_SAZ_4_Beitrags_H_Hoeffling.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt abgerufen am 19.11.2015

²² Bundesnetzagentur (BNA, 2015): Regelenergie. Online-Ressource, Link: http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/Engpassmanagement/Regelenergie/regelenergie-node.html, zuletzt abgerufen am 19.11.2015

²³ Fraunhofer-Gesellschaft (FhG, 2010): Presseinformation – Ökostrom als Erdgas speichern. Online-Ressource, Link: <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2010/04/strom-erdgas-speicher.html>, zuletzt abgerufen am 19.11.2015

²⁴ Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK, 2015): Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden. Online-Ressource, Link: https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis_Bevoelkerungsschutz/Band_13_Notstromversorgung.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt abgerufen am 19.11.2015

²⁵ Fraunhofer ISI (2012): Bewertung des Aufbaus einer Ladeinfrastruktur für eine Redox-Flow-Batterie-basierte Elektromobilität. Online-Ressource, Link: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e-x/de/working-papers-sustainability-and-innovation/WP06-2012_redox-flow-batterie.pdf, abgerufen am 19.11.2015

LIB-ROADMAPPING AM FRAUNHOFER ISI



IMPRESSUM

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
info@isi.fraunhofer.de
www.isi.fraunhofer.de
Projektleitung: Dr. Axel Thielmann

Förderung

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat 511, Neue Werkstoffe, Nanotechnologie
53170 Bonn
www.bmbf.de

Projektträger

Projektträger Jülich
Geschäftsbereich Neue Materialien und Chemie, NMT
52425 Jülich
www.fz-juelich.de

Autoren

Dr. Axel Thielmann
Andreas Sauer
Mario Schnell
Prof. Dr. Ralf Isenmann
Prof. Dr. Martin Wietschel

Gestaltung

MarketingConsulting Liljana Groh, Karlsruhe

Illustrationen

Heyko Stöber, Hohenstein

Kontakt

Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI
Competence Center Neue Technologien
Dr. Axel Thielmann
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Telefon +49 721 6809-299
Fax +49 721 6809-315
axel.thielmann@isi.fraunhofer.de
www.isi.fraunhofer.de

© Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI,
Karlsruhe, Dezember 2015

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI analysiert Entstehung und Auswirkungen von Innovationen. Wir erforschen die kurz- und langfristigen Entwicklungen von Innovationsprozessen und die gesellschaftlichen Auswirkungen neuer Technologien und Dienstleistungen. Auf dieser Grundlage stellen wir unseren Auftraggebern aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft Handlungsempfehlungen und Perspektiven für wichtige Entscheidungen zur Verfügung. Unsere Expertise liegt in der fundierten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Forschungsansatz.

Heute beschäftigt das Fraunhofer ISI rund 240 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, darunter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Natur-, Ingenieur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, die pro Jahr an rund 370 Forschungsprojekten arbeiten. Das jährliche Budget, knapp 23 Millionen Euro im Jahr 2014, wird vornehmlich durch Aufträge der nationalen und internationalen öffentlichen Hand, aus der Wirtschaft sowie von Stiftungen und Wissenschaftsorganisationen eingenommen.

Als international führendes Innovationsforschungsinstitut pflegen wir einen intensiven wissenschaftlichen Dialog mit den USA, Japan sowie den BRICS-Ländern, beispielsweise durch den Austausch von Gastwissenschaftlern.

Das Fraunhofer ISI arbeitet eng mit seinen Partnern, dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), der Universität Kassel, der Universität Straßburg, der ETH Zürich, dem Virginia Tech in den USA und dem Institute of Policy and Management (IPM) in Peking zusammen.

