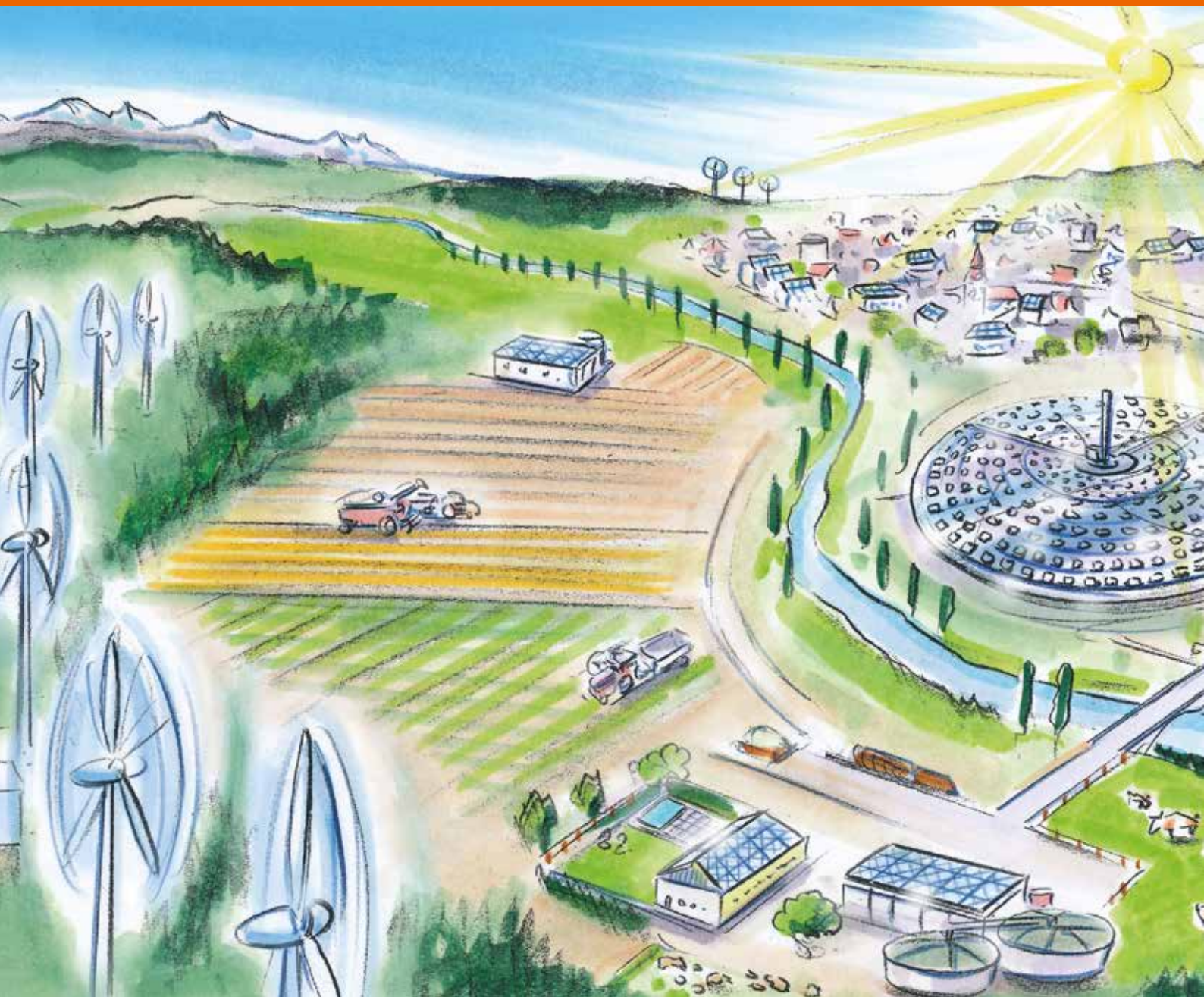


GESAMT-ROADMAP STATIONÄRE ENERGIESPEICHER 2030



VORWORT



Die Wirtschaftlichkeit bzw. Netzparität für stationäre Energiespeicher in Privathaushalten ist fast erreicht: Die zu erwartenden fallenden Preise werden nach verschiedenen Studien und Einschätzungen der Industrie zu einem massiven Ausbau der Hausspeichersysteme führen. Diese dienen dann einerseits der Eigenbedarfsoptimierung und andererseits der Netzentlastung. In Bezug auf Haushaltskunden wird dadurch ein deutlicher Strukturwandel in der Energiewirtschaft eingeläutet. Für den Anlagenbesitzer wirtschaftliche Systeme sollten in spätestens 5 Jahre verfügbar sein können.

Energiepolitik und Energiewirtschaft sollten sich aktiv darauf vorbereiten und die notwendigen Rahmenbedingungen schaffen: Für die Energiewirtschaft bedeutet dies, nicht so sehr den Verkauf des Produkts „Strom“ in den Vordergrund des Geschäftsmodells zu stellen, als vielmehr durch andere Produkte zum Partner der sogenannten „Prosumer“ zu werden.¹ Sie müssten sich zu Energiedienstleistern weiterentwickeln, die den Kunden zum Beispiel bei der Optimierung des Energieverbrauchs, beim Energiemanagement, bei Installation und Betrieb der PV-Speicher-Systeme und bei der Vermarktung des Flexibilitätspotenzials unterstützen. Deutlich ist, dass vor allem große amerikanische IT-Unternehmen darüber hinaus darauf abzielen, den Haushalten Komplettversorgungspakete mit Kommunikation, (Elektro-)Mobilität (inkl. V2G), Wärme (inkl. thermische Speicher) und Strom (inkl. PV und Batteriespeicher) anzubieten. Dabei stellt Strom den kleinsten Wertanteil dar. Die Energiepolitik hingegen müsste notwendige Rechtsanpassungen vornehmen und diese Entwicklungen zu unterstützen.

In der vorliegenden „Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ wird das Portfolio an stationären Energiespeichertechnologien ausgewählten Anwendungen bzw. Geschäftsmodellen gegenübergestellt. Gegenüber der heute eingesetzten Referenztechnologie werden Substitutionsszenarien entwickelt, welche aufzeigen, wann eine alternative Technologie eine Verbesserung gegenüber dem jeweiligen Status quo erzielen kann und somit in der jeweiligen Anwendung eingesetzt werden und sich etablieren kann. Betrachtet werden vier besonders relevante Anwendungsfälle, darunter dezentrale, netzgekoppelte PV-Batteriesysteme zur Eigenverbrauchsoptimierung.

Der Abgleich zwischen dem Technologieangebot unter Berücksichtigung der erwarteten Entwicklungspotenziale mit den anwendungsspezifischen Anforderungen ergibt ein differenziertes Bild, in welchem ganz unterschiedliche technische Lösungen attraktiv sind. Eine wesentliche systematische Schwierigkeit bei der Vorhersage der Zukunft ist stets die Einschätzung des Entwicklungspotenzials der Referenztechnologien, wenn diese durch neue Technologie unter Druck gesetzt werden. Zellpreise von 120 €/kWh für LIB, wie sie für 2020 inzwischen angenommen werden, werden vielen neuen Technologien den Markteintritt nicht leicht machen. Volkswirtschaftliche Betrachtungen zeigen, dass zusätzliche Speicher für wenige Stunden erst notwendig werden, wenn die EE-Erzeugung über 40 Prozent liegt. Langzeitspeicher für 2 bis 3 Wochen Überbrückung werden dann erst jenseits von 80 Prozent EE-Anteil nötig. Der Roll-out für stationäre Energiespeicher (insbesondere elektrochemische) wird aber getrieben durch persönliche und betriebswirtschaftliche Erwägungen und wird daher viel dynamischer wachsen, als dies bei einer volkswirtschaftlichen Betrachtung notwendig wäre. Die vorliegende Roadmap betrachtet daher gerade diese ersten Anwendungen und Märkte, welche sich bis 2030 entwickeln dürften und ist ein sehr hilfreiches Nachschlagewerk mit einer Übersicht zu den Technologien und den möglichen Entwicklungspfaden.

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer
RWTH Aachen – Lehrstuhl für Elektrochemische
Energiewandlung und Speichersystemtechnik

EINLEITUNG

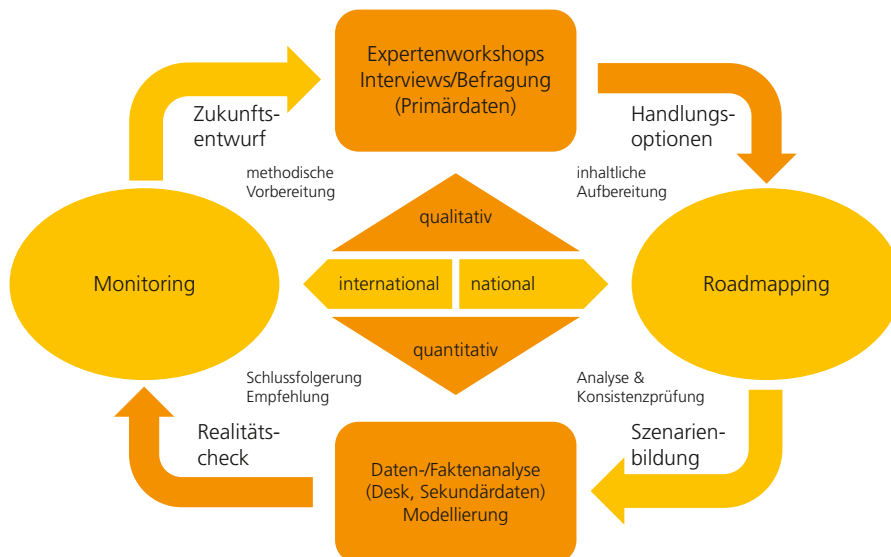
GESAMT-ROADMAP STATIONÄRE ENERGIESPEICHER

In der „Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ wird das Technologieangebot aus der „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ ausgewählten Anwendungen bzw. Geschäfts-modellen aus der „Produkt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ gegenübergestellt, in welchen die Lithium-Ionen-Batterie (LIB) aktuell bzw. kurz- bis mittelfristig eingesetzt wird oder werden kann.

Gegenüber der heute eingesetzten Referenztechnologie werden Substitutionsszenarien entwickelt, welche aufzeigen, wann eine alternative Technologie eine Verbesserung gegenüber dem jeweiligen Status quo erzielen und somit in der jeweiligen Anwendung eingesetzt werden und sich etablieren kann. Betrachtet wer-

den (1) dezentrale, netzgekoppelte Photovoltaik (PV)-Batteriesysteme zur Eigenverbrauchsoptimierung, (2) die (Multi purpose-)Eigenbedarfsoptimierung mit größeren Energiespeichern gemeinsam mit dem Peak Shaving sowie weiterhin (3) die Direktvermarktung Erneuerbarer Energien (Erzeugungs- bzw. Netzseite, z. B. in Inselnetzen) und (4) die Regelleistung.

Der Abgleich zwischen dem Technologieangebot unter Berücksichtigung der erwarteten Entwicklungspotenziale mit den anwendungsspezifischen Anforderungen ergibt ein differenziertes Bild, in welchem ganz unterschiedliche technische Lösungen attraktiv sind.



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

Vor allem hinsichtlich der Kosten werden LIB die Blei-Säure-Batterie (Pb) im Bereich der PV-Batteriesysteme bis 2020 zunehmend ablösen. Bereits heute überwiegen hier die verkauften LIB-Systeme (in Deutschland rund 70 Prozent gegenüber 30 Prozent Pb-Systemen). Bzgl. kalendarischer und zyklischer Lebensdauer liegt der Vorteil z. B. deutlich bei LFP/LTO-Systemen.

In der Eigenbedarfsoptimierung und beim Peak Shaving (100kW–5 MW Bereich) ist die LIB für Hochstromanwendungen relevant. Es wird zwischen Energie- und Leistungsanwendungen unterschieden. Auch hier gelten LIB und Pb als Referenztechnologien. Aufgrund der hohen Unsicherheiten bzgl. der Langzeitstabilität und damit kalendarischen Lebensdauer von Redox-Flow-Batterie (RFB)-Systemen wird eine zukünftige Beobachtung und Neubewertung dieser Technologie nötig sein. Sie könnte aber jenseits dem Jahr 2020 in dieser Anwendung wirtschaftlich werden und sich etablieren.

Für die Direktvermarktung erneuerbarer Energien in PV-Parks kann die LIB kurzfristig den Standard darstellen, sie könnte aber zwischen 2015 und 2020 mit kostengünstigen adiabatischen Druckluftspeichern konkurrieren und jenseits 2020 ggf. mit der RFB oder Natrium (Na)-basierten Niedrig-Temperatur-Systemen. In Windparks stellen Natrium-Schwefel (Hochtemperatur)-Batterien (NaS) heute die Referenztechnologie dar.

Für Regelleistung bilden Pumpspeicher, Prozesssteuerung oder rotierende Massen den Stand der Technik. Supercaps, Schwungräder, Lithium-Kondensatoren könnten kurz- bis mittelfristig ein Substitutionspotenzial haben. LIB haben über die aktuell drastisch sinkenden Zellpreise gute Chancen für einen Markteintritt. Sie haben hier das Potenzial eines "Game Changers". Allerdings ist der Markt begrenzt und es ist ggf. schon kurz- bis mittelfristig wieder mit einer Marktsättigung für diese Anwendung zu rechnen.

Somit werden auch langfristig in vielen Bereichen LIB insbesondere mit Pb, RFB und NaS konkurrieren. Es ist fraglich, ob sich viele weitere (z. B. Na-basierte Niedrig-Temperatur-)Batteriesysteme etablieren können oder sich vielmehr Technologiestandards durchsetzen werden. In diesem Fall hätte die LIB das Potenzial, sich jenseits des Jahres 2030 als die dann ggf. wirtschaftlichste Lösung in vielen stationären Anwendungen durchzusetzen.

GESAMT-ROADMAP STATIONÄRE ENERGIESPEICHER 2030

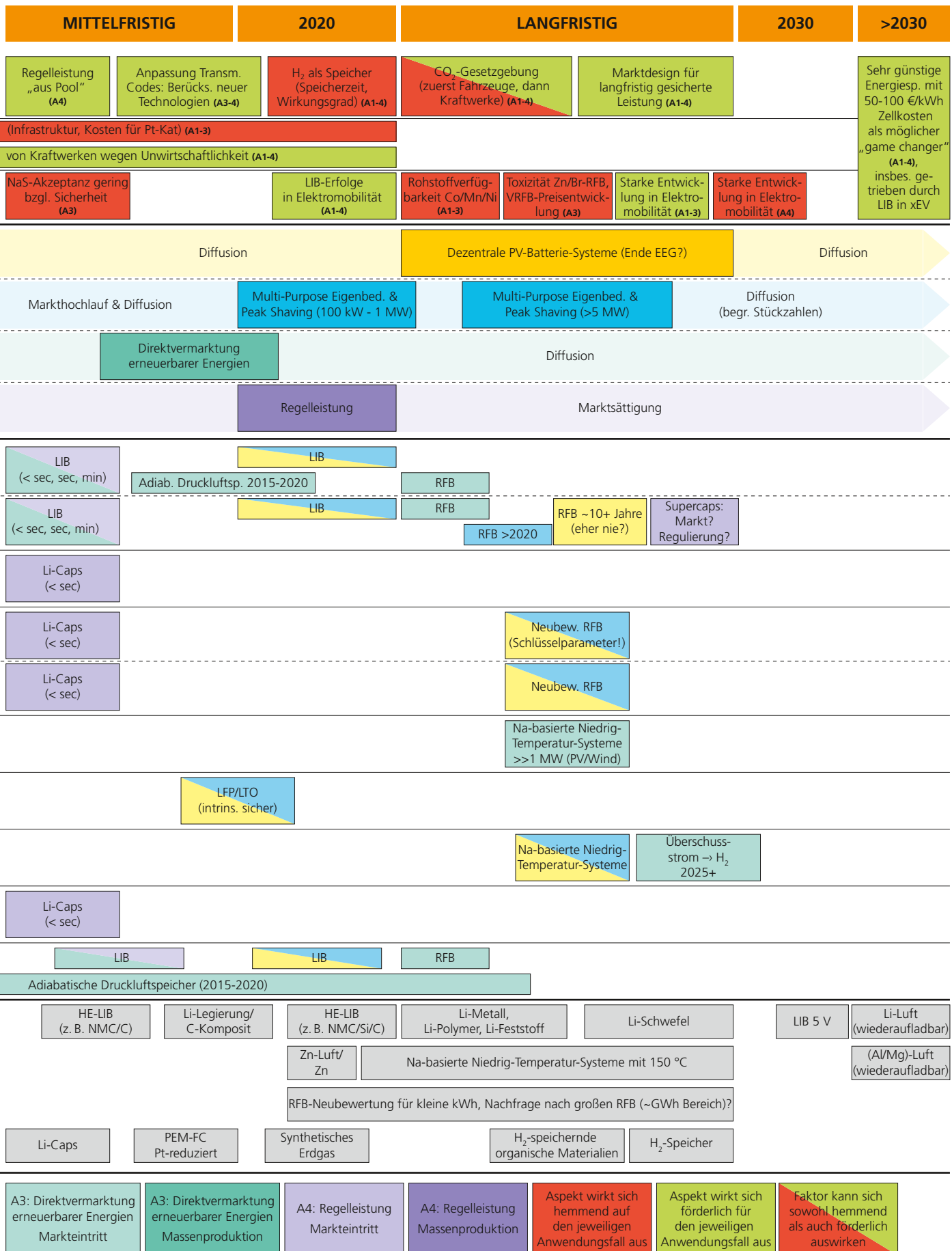
ZEIT →		2015				KURZFRISTIG	
ANWENDUNGSBEZ. RAHMENBEDINGUNGEN	Regulierung und Förderung	(Finanzielle) Anreize z. B. durch MAP (A1)	Kompensation für Systemdienstleist. (A1-4)	(Finanzielle) Anreize z. B. durch EEG-Novelle (A1-4)	FuE-Förderung (Markteinführung) (A1-4)	FuE-Förderung (Markteinführung) (A1-4)	Steig. Erfahrung bzgl. Energiespeicher-Transp. zur Herstellung und in Logistik (A1-4)
	Infrastruktur	Trend zu lokaler/dezentraler Erzeugung u. Verbrauch mit kleineren Netzeinheiten (A1-2)		Derzeit. Preisbildung f. „ausgespeicherte Energie“ (A3-4)	Normierung/Standardisierung (A1-4)	Entwicklung von Geschäftsmodellen für Energiespeicheranwendungen (A1-4)	H ₂ als Speicher Dauerhafte Abschaltungen
	Gesellschaftliche/Kundenakzeptanz	Versorgungssicherheit/Unabhängigkeit, USV-Systeme (A1-2)		Unsicherheit, keine langfristige Planung möglich (A1-4)			Brand eines Speichersystems z. B. im EFH (A1)
ANWENDUNGEN & PRODUKTE	Anwendungsfall	A1	Dezentrale PV-Batterie-Systeme		Markthochlauf		Dezentrale PV-Batterie-Systeme (Wirtschaftlich)
		A2	Markt- und Technologievorbereitung		Multi-Purpose Eigenbed. & Peak Shaving (100 kW - 1 MW)	Markthochlauf	Multi-Purpose Eigenbed. & Peak Shaving (>5 MW)
		A3	Markt- und Technologievorbereitung			Direktvermarktung erneuerbarer Energien	Markthochlauf
		A4	Markt- und Technologievorbereitung		Regelleistung		Markthochlauf
TECHNOLOGIEEIGENSCHAFTEN VS. MARKTANFORDERUNGEN	Kosten	Pro ausgespeicherter kWh/Betrieb	LIB, Pb	LIB, NaS			
		Investition	Pb	LIB, NaS			Adiab. Druckluftspeicher
	Wirkungsgrad		LIB	LIB, NaS	Supercaps (< sec)	Schwungrad (< sec, sec)	
			LIB	Rot. Masse, Prozessst., Pumpsp.			
	Lebensdauer	Kalendarisch	LIB	LIB, NaS	Supercaps (< sec)	Schwungrad (< sec, sec)	LFP/LTO (20 Jahre)
		Zyklisch	LIB	Rot. Masse, Prozessst., Pumpsp.	Supercaps (< sec)	Schwungrad (< sec, sec)	LFP/LTO (15.000-20.000)
	Umgebungsbedingungen (Temperatur)		Pb	LIB, NaS			
			Pb	Rot. Masse, Prozessst., Pumpsp.			
	Sicherheit		Pb, LIB (LTO)	LIB (LTO), NaS			
			Pb, LIB (LTO)	Rot. Masse, Prozessst., Pumpsp.			
Volumetrische Energiedichte		LIB	LIB, NaS			LFP/LTO (geringe Verbess.; mit LiMnPO ₄)	
		LIB	Rot. Masse, Prozessst., Pumpsp.				
Volumetrische Leistungsdichte		LIB	LIB, NaS	Supercaps (< sec)	Schwungrad (< sec, sec)		
		LIB	Rot. Masse, Prozessst., Pumpsp.				
Energiesp. für 50-100 €/kWh als möglicher game changer		LIB, Pb	LIB, NaS				
		LIB, Pb	Rot. Masse, Prozessst., Pumpsp.				
TECHNOLOGIEN	Elektrochemisch: Li-basiert	LIB (LFP/Graphit, LFP/LTO, Li-Polymer etc.), LIB (4 V)		Optimierte LIB (z. B. LFP kostenreduziert, LFP/LTO etc.)			
	Elektrochemisch: Nicht Li-basiert	Pb, NaS (HT), ZEBRA (HT), NiMH					
	Chemisch/Elektrisch/Mechanisch/Sonstige	Redox-Flow-Batterie (RFB) (MWh-Speicher, ab 200-300 kWh)					
		PHES, CAES, Schwungrad, H ₂ /BZ, Supercaps		Next generation Supercaps, BZ (PEM-FC, SOFC), Adiabatische Druckluftspeicher, unkonv. Pumpspeicher			

A1: Dezentrale PV-Batteriesysteme Markteintritt

A1: Dezentrale PV-Batteriesysteme Massenproduktion

A2: Multi-Purpose Eigenbedarfsoptimierung und Peak Shaving Markteintritt

A2: Multi-Purpose Eigenbedarfsoptimierung und Peak Shaving Massenproduktion



ANWENDUNGEN UND PRODUKTE

Die Roadmap fokussiert geographisch hinsichtlich der Anwendungen und Produkte primär auf Deutschland als nationalem Markt bzw. bewegt sich im Kontext der Rahmenbedingungen bis auf EU-Ebene. In anderen Regionen der Welt liegen andere anwendungsbezogene Rahmenbedingungen vor, deren Analyse nicht Ziel dieser Roadmap ist. Denn sie soll primär die deutschen Institutionen aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft unterstützen, um Deutschlands Position hinsichtlich der FuE sowie der Kommerzialisierung von stationären Energiespeichern aufzubauen und zu stärken.

In der „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ ist das Technologieportfolio im Zeitraum zwischen 2015 und 2030 entsprechend der potenziellen Marktreife bzw. dem Markteintritt verordnet und die vielversprechendsten Trends sind dort ausgewählt und bewertet. Damit stehen stationäre Speicherlösungen prinzipiell zur Verfügung, welche sich jedoch nicht zwingend am Markt platzieren müssen, sondern weiterhin (z. B. aus Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen) scheitern können. Um nun dieses Technologieportfolio mit den in der „Produkt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ aufgezeigten Geschäftsmodellen bzw. Anwendungen auf Lokal-, Verteil- und Übertragungsebene (dort werden die technischen Lösungen als „Black box“ betrachtet) zu verknüpfen, ist es notwendig, konkrete Anwendungsfälle zu definieren. Denn sowohl das Anforderungsprofil als auch die Technologieauswahl können stark mit dem Anwendungsfall variieren.

Da der Fokus der Roadmap weiterhin auf elektrochemischen Energie- bzw. „Strom“-Speichern liegt, werden entsprechende für diese Technologie geeignete Anwendungen identifiziert. Das gesamte Feld der „Wärmespeicher“ ist sehr komplex und weit, es wird an dieser Stelle ebenfalls nicht vertieft betrachtet.

In der „Produkt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ werden folgende Anwendungen (a, b, c) diskutiert, welche in dieser Roadmap wieder aufgegriffen und um weitere Beispiele ergänzt werden:

- a) Dezentrale, netzgekoppelte Photovoltaik (PV)-Batteriesysteme zur Eigenbedarfsoptimierung,
- b) Eigenbedarfsoptimierung Campus/Gewerbe/Industrie,
- c) Industrie: Deckelung Anschlusswerte Peak Shaving.

Diese Anwendungsfälle fokussieren allerdings auf Geschäftsmodelle „hinter“ dem Stromnetz (auf Endkundenseite), wobei es auch „vor“ dem Stromnetz (auf der Erzeugungsseite) Anwendungsfälle gibt. Diese würden insbesondere im Zuge einer stärkeren Direktvermarktung entstehen, sollte sich der Energiemarkt verändern (z. B. wenn auch signifikante Mengen von Erneuerbaren Energien vermarktet werden müssen).

Auch die Leistungsseite „im“ Stromnetz selbst (z. B. Bereitstellung von Regelleistung im Sekunden- oder Minutenbereich) ist noch nicht in einem Beispiel abgedeckt, jedoch werden hier keine relevanten Anwendungsfälle erwartet, da Energiespeicher zwar einen Teil des Stromnetzes darstellen könnten (sowohl im Übertragungs- als auch Verteilnetz, sie wären allerdings aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich. Denn auch im Stromnetz sind die Blindleistungskompensation oder andere Systemdienstleistungen mit Energiespeichern als Netzbetriebsmittel möglich, wenn sie tatsächlich ausschließlich für Netzbelange genutzt und nicht am Energiemarkt zur Arbitrage eingesetzt werden.

Hierbei handelt es sich vor allem um eine regulatorische Hürde. Im Gasbereich ist es bereits heute so, dass die Speicher aus netzwirtschaftlichen Gründen Teil des Netzes sind. Sie werden quasi im Netz selbst bewirtschaftet und sind damit Gasnetzbetriebsmittel. Im Prinzip wäre genau dies auch für das Stromnetz denkbar, es widerspricht allerdings dem Gedanken der Wirtschaftlichkeit: Je mehr Anwendungsfälle es für einen Energiespeicher gibt, desto wirtschaftlicher wird seine Anschaffung und sein Betrieb. Ohne die Nutzung von Arbitrage verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit.

Hinsichtlich der Rolle von Energiespeichern im Netzausbau sind diese nur wirtschaftlich, wenn sie (z. B. im ländlichen Raum) als Alternative zum Netzausbau gelten. Ein regulatorischer Sachverhalt wird es dann, wenn die Energieversorger die Leistung

abnehmen müssen – sie stecken insofern in der Zwickmühle, weil sie auch nur dann im Voraus investieren können, wenn entsprechende Anschlussanfragen vorliegen. Pilotprojekte hierzu laufen, aber sie bilden noch kein funktionierendes Geschäftsmodell ab. „Über“ der deutschen Regulierung spielt aber vor allem die EU-weite Regulierung eine große Rolle – was Deutschland vorgeben möchte, mag nicht automatisch EU-konform sein.

Anwendungsfall a und b unterscheiden sich vor allem über die Größenordnung, für Privathaushalte, kleine Industrieanlagen und Wohnblocks von wenigen kWh bis zu 100 kWh und ggf. auch für die Industrie von 100 kWh bis zu 1 MWh. Beides könnte mit PV kombiniert werden, im Industriefall wird die Eigenbedarfsoptimierung aber vor allem anhand konventioneller Energieerzeugnisse vorgenommen. Letztere wachsen deutlich, und für ihre Zwischenspeicherung werden Energiespeicher benötigt – der Trend zur Eigenversorgung setzt sich deshalb fort, da Unternehmen damit den steigenden Umlagen entkommen können. Wie langfristig dieser Trend sein wird (bzw. wie lange der Privatverbraucher die Kosten für das mehrspurige Energiesystem trägt), ist unklar.

Für die Gesamt-Roadmap werden nun folgende Anwendungsfälle vertiefend betrachtet:

Anwendungsfall A1:

Dezentrale, netzgekoppelte PV-Batteriesysteme zur Eigenbedarfsoptimierung

Diese Anwendung (siehe oben, Fall a)) stellt den ersten und aktuell wichtigsten stationären Markt für elektrochemische Energiespeicher (insbesondere Lithium-Ionen-Batterien (LIB)) dar. Off-Grid zählen natürlich die unterbrechungsfreie Stromversorgung und andere Märkte zu relevanten Anwendungen, in welchen heute beispielsweise noch die Blei-Säure-Batterie (Pb) dominiert. Der Markteintritt ist in diesem Anwendungsfall bereits erfolgt.

Die Marktdiffusion wird sich in zwei Phasen aufspalten: Bereits seit 2013 ist ein erster Anstieg in der Nachfrage nach PV-Batteriesystemen in Privathaushalten zu beobachten, da die Kosten hierfür weiter fallen und die Systeme zunehmend wirtschaftlich werden. Allerdings ist die Differenz zwischen dem zu bezahlenden Strompreis und den Kosten für Strom aus einem Batteriesystem in Zusammenhang mit der PV-Anlage „auf dem Dach“ immer noch groß genug, was eine breite Diffusion behindert. Verstärkt wird diese voraussichtlich mit dem Auslaufen des EEG um das Jahr 2021, was für einen weiteren Anstieg sorgen dürfte. In diesem Jahr werden viele Anlagen aus der Förderung fallen und die Energiespeicherung zum Eigenverbrauch dürfte sehr rentabel werden.

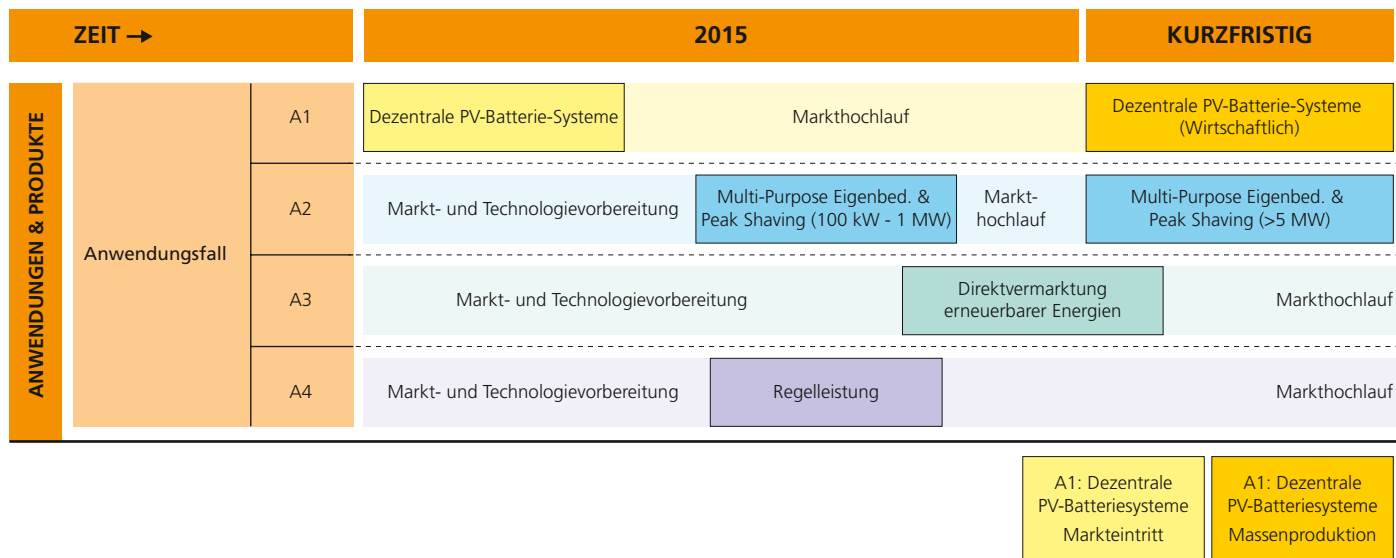
Eine gewisse Unsicherheit liegt bzgl. dieser Annahmen vor, denn Energieversorgungsunternehmen könnten die Leistungspreise hochsetzen, die Grundgebühr für Endkunden erhöhen und die kWh-Preise senken. Dann würde die oben erwähnte Differenz sinken und die Anschaffung von Energiespeichersystemen weniger lohnenswert sein. Auf der anderen Seite wäre es auch möglich, dass sich mehr Kunden bei steigenden kWh-Preisen in die Autarkie verabschieden. Diese Mechanismen gilt es weiter zu beobachten.

Anwendungsfall A2:

Multi-purpose Eigenbedarfsoptimierung & Peak Shaving

Die Anwendungsfälle b) (Eigenbedarfsoptimierung Campus/ Gewerbe/Industrie) und c) (Industrie: Deckelung Anschlusswerte Peak Shaving) werden mit Blick auf die Industrie in einem einzigen Anwendungsfall zusammengeführt. Der Markteintritt für kleinere Anlagen ist bereits gegeben bzw. erfolgt kurzfristig (es gibt bereits konkrete Ansätze, Testanlagen – die wirtschaftlichen Ergebnisse sind abhängig vom gefahrenen Verbrauchsprofil, für größere Betriebe noch ungewiss). Eine breitere Marktdiffusion wird mittelfristig bzw. ab 2020 bei kleineren Anlagen und anschließend auch größeren Anlagen erwartet.

„Multi-purpose“ bedeutet hier, dass mehrere Anwendungszwecke erfüllt werden können (bis hin zur Werbung für ein „grüneres Image“). Durch dieses Gesamtpaket wird der Einsatz von Energiespeichern deutlich attraktiver. Anlagen im Bereich von 5 MW gelten aber als zu groß – dieser Anwendungsfall trifft daher eher auf die Kunden zu, welche nicht für den Großkundertarif in Frage kommen und deshalb wesentlich höhere Strompreise bezahlen müssen. In diesem Sinne kann es auch Kunden geben, deren Stromverbrauch sehr nahe an die in Paragraph 19 „Sonderformen der Netznutzung“ Absatz 2 beschriebene Ausnahmeregelung heranreicht: Ein individuelles (und deutlich reduziertes) Netzentgelt ist einem Kunden dann anzubieten, wenn die Stromabnahme aus dem Netz der allgemeinen Versorgung für den eigenen Verbrauch an einer Abnahmestelle pro Kalenderjahr sowohl die Benutzungsstundenzahl von mindestens 7000 Stunden im Jahr erreicht als auch der Stromverbrauch an dieser Abnahmestelle pro Kalenderjahr 10 GWh übersteigt.² Kunden, deren Verbrauch sehr nah an den 7000 Stunden Netznutzung (aber nicht darüber) liegt, können sich durch den Einsatz von Energiespeichern die Netznutzungsentgelte einsparen – mit ggf. sehr hohem Verbrauch, vielleicht weit über den angesetzten 10 GWh. Auch hierin liegt also ein geeigneter Anwendungsfall. Entgegen dem Anwendungsfall A1 bedeutet eine Marktdiffusion hier dennoch eine begrenzte Stückzahl, weshalb in den Jahren jenseits 2030 auch mit einer Sättigung gerechnet werden könnte.



Anwendungsfall A3: Direktvermarktung Erneuerbarer Energien (Erzeugungsbzw. Netzseite, z. B. in Inselnetzen)

Hier werden auch Energiespeicher im Einsatz „vor“ dem Stromnetz (auf Erzeuger- bzw. Netzseite) betrachtet. Sie dienen der Direktvermarktung Erneuerbarer Energien in einem zukünftigen, wie immer auch gearteten Strommarkt. Die „Direktvermarktung“ wird auch in der „Produkt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ diskutiert, allerdings mit Fokus auf die PV. Hier wird nun auch um die Windenergie ergänzt. Markteintritt und -hochlauf dürften kurz- bis mittelfristig erfolgen und zu einer Diffusion ab 2020 führen. Weltweit gelten die als „Inselanlagen“ besonders eingesetzten Energiespeicher als der relevanteste Anwendungsfall für elektrochemische Energiespeicher. Für den deutschen Markt spielen Inselanlagen allerdings eine untergeordnete Rolle und Energiespeicher stehen vielmehr mit anderen Flexibilisierungsoptionen (z. B. Netzausbau) in Konkurrenz. Jedoch dürfte die Direktvermarktung von z. B. Windenergie in Deutschland schneller an Bedeutung gewinnen.

Anwendungsfall A4: Regelleistung

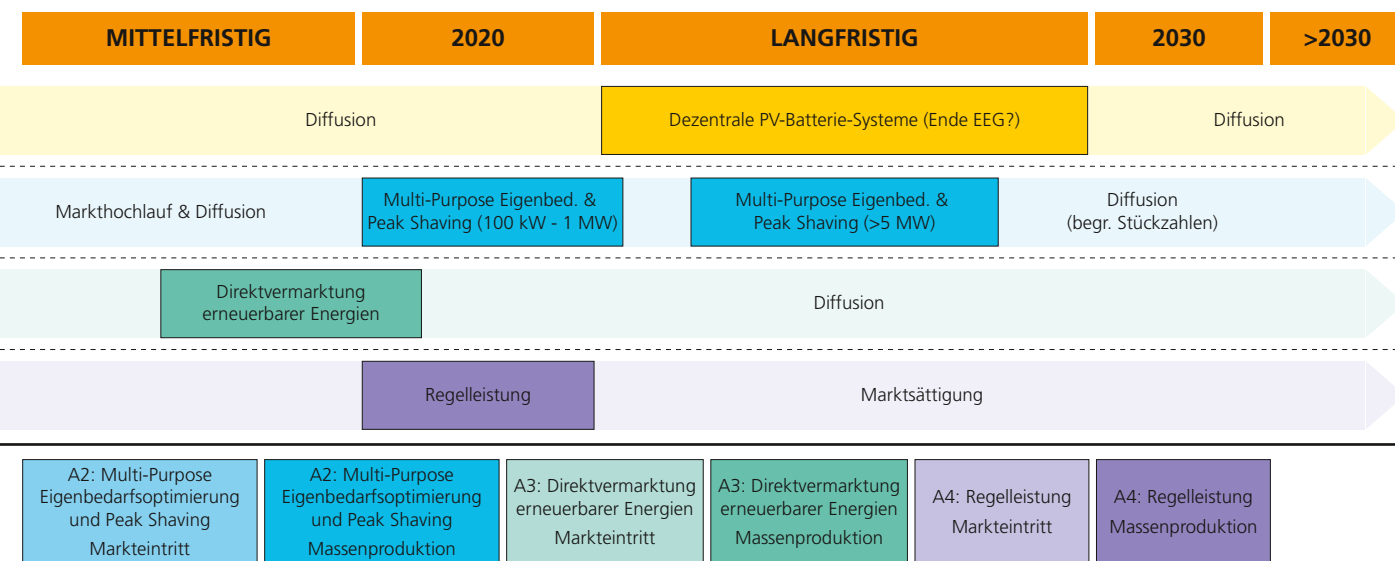
Es können kraftwerksnahe (z. B. in Hinblick auf die Kraftwerksauslastung, die sogenannte „dispatchable energy“) und netznahe (z. B. in Hinblick auf die Leistungskomponente Netzstabilität) Energiespeicher unterschieden werden. Netznahe Energiespeicher werden als relevanter erachtet (eher dezentral und auf

der Niederspannungsebene). Sie können Schwarzstart und eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) ermöglichen, aber vor allem rotierende Massen (in der Sekundenreserve) bereitstellen und damit das Ziel der Netzstabilisierung unterstützen. Energiespeicher für die Netzstabilisierung gelten als äußerst relevanter Anwendungsfall für Deutschland bzw. im Kontext der EU, zumal auf Erzeugungsbzw. Netzseite.

Hinsichtlich der Netzstabilität ist anzumerken, dass die Regenergiepreise zurückgegangen sind, da deutlich mehr Anbieter in den ohnehin relativ kleinen Markt gekommen sind (unter Regenergie wird der Abruf von Leistung für ungeplante Abweichungen vom Plan verstanden).

In Deutschland laufen einige Forschungsarbeiten zu Systemdienstleistungen (primär/sekundär/tertiär) für Verteilnetz-Betreiber, welche auch die „Spannungshaltung“ umfassen, was als klare „Netzdienstleistung“ (für Verteil- und Übertragungsnetz) aufgefasst werden kann, ein anderes Beispiel ist die Blindleistungskompensation. Die „Spannungshaltung“ kann mittels einer Batterie geleistet werden, sie stellt also kein „Regelleistungsthema“ dar.

„Systemdienstleistungen“ (sind „Netzdienstleistungen“, das Netz ist das System), und die Bereitstellung von Regelleistung unterscheiden sich allerdings, denn „Reserveleistung“ muss z. B. nicht bereitgestellt werden, sie wird vermarktet, während „Systemdienstleistungen“ auf der regulatorischen Seite vom Netzbetreiber eingefordert werden können bzw. über das EEG angereizt werden.



Perspektivisch ist hierbei nicht abzusehen, dass Energiespeicher zur Regelleistungsbereitstellung verkauft werden können – sie werden höchstens so eingesetzt, sollten sie schon angeschafft worden sein.

Die heutigen regulatorischen Rahmenbedingungen führen dazu, dass elektrochemische stationäre Energiespeicher nur eingeschränkt betrieben werden. In Zukunft könnten diese Speicher neben Wirkleistung auch Blindleistung bereitstellen. Im Übertragungsnetz wird über Blindleistung Spannungshaltung als eine Netzdienstleistung realisiert. Im Verteilnetz ist Spannungshaltung über Blindleistungsleistungsbereitstellung im geringeren Umfang ebenfalls möglich. Diese Netzdienstleistung könnten elektrochemische Energiespeicher auf Verteilnetzebene anbieten, dies ist allerdings im heutigen regulatorischen Rahmen noch nicht vorgesehen. Um dies als Geschäftsmodell für Energiespeicher aufzubauen, müssen erst die Rahmenbedingungen geschaffen werden. Zudem könnten Energiespeicher zwar Blindleistung bereitstellen, dafür würden aber voraussichtlich keine Energiespeicher explizit gebaut werden.

Für die Regelleistung wird bis zum Jahr 2020 ein Erreichen des Massenmarktes erwartet, jedoch wächst der Regelenergie-Markt nicht beliebig, denn jede Anlage, welche dafür gebaut wird, reduziert die erzielbaren Preise für alle anderen (potenziellen) Anbieter. Der Markt ist in diesem Fall begrenzt bzw. ein Nischenmarkt, weshalb nach 2020 bereits mit einer Marktsättigung zu rechnen ist.

Für den jeweiligen Anwendungsfall wird im Folgenden der Stand der Technik (Referenztechnologie und Einsatzbereich) bzgl. der aktuell eingesetzten Speicherlösung festgehalten. Für den Zeitraum bis 2030 wird anschließend jeweils ermittelt, ob und welche technische Weiterentwicklung dieser oder einer neuen Lösung den Stand der Technik künftig ablösen kann.

Dabei wird identifiziert, wann anhand welcher Leistungsparameter ein technischer Durchbruch erzielt wird, so dass diese technische Lösung für den spezifischen Anwendungsfall attraktiv und wirtschaftlich wird und daher den bisherigen Stand der Technik substituieren kann. Die in der „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ verorteten Technologien sind in dieser Roadmap als Technologieportfolio insgesamt (unter Energiespeichertechnologien) zusammengefasst und werden im Bereich der Leistungsparameter für den spezifischen Fall ggf. aufgegriffen, falls sie den Leistungsanforderungen der Anwendung gerecht werden können. In die Bewertung einbezogen werden:

- Kosten pro ausgespeicherter kWh und für die Investition,
- Wirkungsgrad,
- Lebensdauer kalendarisch und zyklisch,
- Umgebungsbedingungen,
- Sicherheit,
- Volumetrische Energiedichte,
- Volumetrische Leistungsdichte.

ZEIT →		2015		KURZFRISTIG	
A1: Dezentrale PV-Batteriesysteme		Dezentrale PV-Batterie-Systeme	Markthochlauf	Dezentrale PV-Batterie-Systeme (Wirtschaftlich)	
TECHNOLOGIEEIGENSCHAFTEN VS. MARKTANFORDERUNGEN	Kosten	Pro ausgespeicherter kWh/Betrieb	LIB, Pb	Markthochlauf & Diffusion	
		Investition	Pb	Markthochlauf & Diffusion	
	Wirkungsgrad		LIB		
	Lebensdauer	Kalendarisch	LIB	Markthochlauf	LFP/LTO (20 Jahre)
		Zyklisch	LIB	Markthochlauf	LFP/LTO (15.000-20.000)
	Umgebungsbedingungen (Temperatur)		Pb		
	Sicherheit		PB, LIB (LTO)		Markthochlauf & Diffusion
	Volumetrische Energiedichte		LIB	Markthochlauf	LFP/LTO (geringe Verbess.; mit LiMnPO ₄)
	Volumetrische Leistungsdichte		LIB		
	Energiesp. für 50-100 €/kWh als möglicher game changer		LIB, Pb		Markthochlauf & Diffusion

A1: DEZENTRALE PV-BATTERIESYSTEME

Größenklasse

Wenige kW bis 100kW („typischer“ Hausenergiespeicher bis Quartierspeicher).

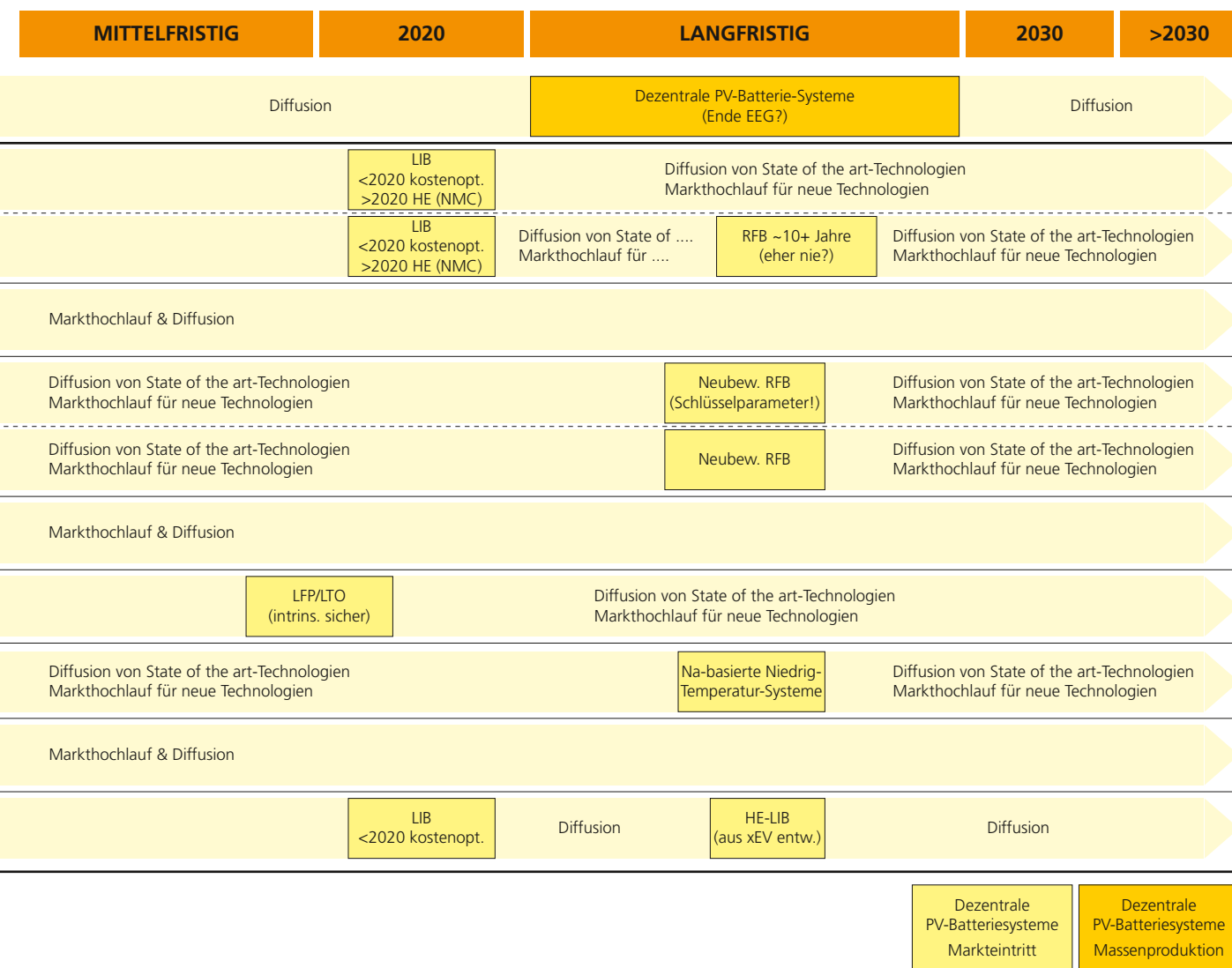
Referenztechnologie

Blei-Säure-Batterien (Pb), Lithium-Ionen-Batterien (LIB) (zu ähnlichen Teilen, in Deutschland überwiegt die LIB mittlerweile als Hausspeicher).

Die Redox-Flow-Batterie (RFB) wird den Referenztechnologien in dieser Klasse kleiner Energiespeicher (z. B. für den Hausgebrauch) eher keine Konkurrenz darstellen, ist aber in ihrer Entwicklung weiter zu beobachten.

Hochtemperatur-Batterien rentieren sich für diesen Anwendungsfall eigentlich nicht. Natriumnickelchlorid-Batterien („ZEBRA“-Batterien, kleinere Module) werden allerdings entwickelt (und sind in den USA auch zu kaufen, Einzelmodule mit 60 Volt – vor allem für den Einsatz in Elektrofahrzeugen), wobei die sehr hohen Wärmeverluste künftig durch den Einsatz von Natrium (Na)-basierten Niedrig-Temperatur-Systemen (~150°C), welche sich in Entwicklung befinden, reduziert werden könnten.

Auch Brennstoffzellen sind eigentlich nicht für diese Anwendung geeignet, da ihre Speicherkapazität nicht ausreicht (mit Elektrolyse zur Rückverstromung könnten sie langfristig eine Rolle spielen, auch die Abwärme könnte genutzt werden – ggf. für komplette Autarkie). Ansonsten ist ihr Wirkungsgrad zu gering und die Technik gilt als zu komplex für diesen Anwendungsfall. Da auch die Anzahl an Volllaststunden zu gering ausfallen dürfte, stellt sich die Preisfrage.



Im Zuge einer langfristigen Entwicklung sind auch Metall-Luft-Batterien wie Zink-Luft- (Zn-Luft) oder Lithium-Luft- (Li-Luft) sowie Lithium-Schwefel-Batterien (Li-S) weiterhin zu beobachten. Konkurrenzfähig wären solche Systeme z.B. über den Preis (Li-Luft werden günstiger sein als die traditionellen Lithium-basierten Batteriesysteme). Bzgl. der Energiedichte sind ihre Vorteile im Fall kleinerer stationärer Energiespeicher nicht so dringend benötigt. Auch ihr systembedingter Nachteil der eher geringen Zyklenzahlen ist unproblematisch: Für die Anwendung im Haushalt werden ~200 Zyklen im Jahr erwartet, für zehn Jahre Lebenszeit also etwa 2000 Zyklen.

Hochleistungssysteme wie Lithium- bzw. Super-Caps oder Schwungräder passen nicht zu diesem Anwendungsfall. Großkraftwerke wie z. B. Druckluftspeicher ebenfalls nicht.

Leistungsparameter

Kosten

Investitionen umfassen den Energiespeicher in einem Batteriesystem (Batteriemanagement mit Steuerelektronik – das Ausmaß der Steuerelektronik hängt von der grundlegenden Batteriezelle ab), aber ohne Leistungselektronik und Wechselrichter. Das Energiespeichersystem ist somit mit der notwendigen Elektronik in einem Gehäuse (z. B. Blei-Säure-Batterie aufgeständert, LIB auf einem Rack) bzw. in einem System mit Tanks abgegrenzt.

Bezüglich der Investitionen sind Pb heute noch im Vorteil, bzgl. der Kosten pro ausgespeicherter kWh sind Pb und LIB konkurrenzfähig. Denn bei Kosten pro ausgespeicherter kWh (Betrieb) fließen mehrere Parameter ein (z. B. Investitionskosten, Lebens-

dauer und Wirkungsgrad). Die LIB (wie heute in dieser Anwendung verwendet, insbes. LFP/Graphit) dürfte sich zwischen 2017 und 2020 zunehmend hinsichtlich reduzierter Kosten durchsetzen.

Jenseits 2020 sind auch Ni-basierte (NMC, NCA) LIB getrieben durch die Entwicklungen in der Elektromobilität stark kostenreduziert zu erwarten. Aktuelle Kosten für die LIB in der Automobilindustrie werden für Großserien (10 000 bzw. x mal 10 000 Stück) bereits deutlich unter 300 €/kWh (System) und unter 200 €/kWh (Zellen) gehandelt. Auch stationäre Systeme (wie hier abgegrenzt) dürften um 2015 bereits bei 400 €/kWh liegen (nicht Gesamtsystem und Endkundenpreise!). Um 2020 könnten sie auf ca. 220 €/kWh (System) fallen. Nach unten sind die Preise aus der Konsumelektronik bereits bekannt, dort kostet die neueste Generation (Typ 18650 oder 26650) heute noch etwa ca. 250 €/kWh. Für stationäre Energiespeicher sind die Preise nach oben anzupassen, weil die Stückzahlen geringer sind und Zusatzkosten wie Einbau, Handling und Transport stärker mit eingehen. Daher hat die Massenproduktion bei einer künftig zu erwartenden erhöhten Nachfrage einen enormen Einfluss auf die Kostenreduktion.

Weiterhin (neben der Unterscheidung Zelle, System und Stückzahl) gilt zu beachten, für wen diese Kosten gelten. Für den Systemlieferanten oder den Anwender. Einkaufspreise in der deutschen Industrie beliefen sich in den letzten Jahren noch auf 400 €/kWh (ca. 300 € Zelle + 100 € zum System), allerdings nicht als Einzelsystem und für den Endkunden, sondern in hoher Stückzahl zum Bau von MWh-Containern.

Aufgrund der massiven Überkapazitäten konnten Systemhersteller in den letzten Jahren vermutlich auch im Bereich der stationären Speicher deutlich günstiger einkaufen. Die Überkapazitäten könnten sogar noch anwachsen, wenn sich der Markthochlauf von Elektrofahrzeugen weiter verzögert (siehe „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“). Es ist in jedem Fall zu erwarten, dass sich die künftigen Batteriepreise sowohl für Systemlieferanten als auch für Endkunden auf einem stetig fallenden und niedrigen Niveau einpendeln werden (siehe Lernkurven in der „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“).

RFB stellen (noch) ein zu großes Investment für diesen „kleinen“ Anwendungsfall dar, es gibt sie aber bereits zu kaufen. Bei den Investitionen kann die RFB somit höchstens langfristig und vor allem für größere Energiespeicher-Anwendungen eine Alternative darstellen. Sie kann heute für 600–700 €/kWh gekauft werden.³ Es muss auch nicht das Standard-RFB-System sein, es gibt Variationsmöglichkeiten zur Vanadium-basierten RFB (VRFB):

Aus den USA bzw. kleinen Hightech-Unternehmen gibt es Systeme auf Basis von Zink-Brom (Zn/Br). Dies sind wesentlich günstigere Rohstoffe als Vanadium. Allerdings könnte die Toxizität von Zn/Br-RFB zu Akzeptanz-Problemen führen. Dennoch ergibt sich vom Endkundenpreis her ein großes Kostensenkungspotenzial auf weniger als die Hälfte (300 €/kWh). In 2016 sind z. B. 1 MWh Speicher für 0,5 Mio US\$ anvisiert (500 \$/kWh)⁴. Natürlich ist aber auch diese Entwicklung von einer gewissen Unsicherheit begleitet. RFB könnten damit aber langfristig noch zu einer potenziellen Konkurrenztechnologie werden.

Wirkungsgrad

LIB stellen die Referenztechnologie dar und werden bzgl. des Wirkungsgrads keinerlei Konkurrenz bekommen, alle anderen Technologien sind schlechter bzw. LIB liegen im Endeffekt bei fast 100 Prozent.

Lebensdauer kalendarisch/zyklisch

Hier ist die beste Alternative schon aktuell die LFP/LTO-Batterie. Erste Systeme sind bereits marktreif, und die Kombination aus Eisenphosphat- (LFP) oder Manganoxid-Kathode (LMO) zusammen mit LTO (sehr langlebig) wirkt sich auf die zyklische Lebensdauer sehr positiv aus (Prognosen gehen in Richtung von 15 000 Zyklen, die Kombination aus LFP/LTO kann bis 20 000 Zyklen leisten). Dies überschreitet den Bedarf bei weitem, 365 Tage bzw. Zyklen pro Jahr ergäbe eine theoretische Lebensdauer von über fünfzig Jahren. Deshalb ist offensichtlich, dass die Herausforderung in der kalendarischen Lebensdauer liegt: Dort lauten die Prognosen auf zwanzig Jahren, es gibt aber noch nicht viele belastbare Daten dazu.

Die RFB führen in Bezug auf ihre zyklische Lebensdauer leicht in die Irre: Die Anzahl der Zyklen einer RFB sagt nicht viel aus, mit ihr kann gespielt werden (aus China kommen Angaben von bis zu 100 000 Zyklen). Die notwendige Hochrechnung auf Vollzyklen wird selten durchgeführt. Ab dem Jahr 2020 sollte deshalb neu bewertet werden, welche technologische Entwicklung es bzgl. der Lebensdauer langfristig geben wird. Eine weitere Optimierung ist zyklisch kaum notwendig, es kommt auf die kalendarische Lebensdauer an und hier stellt die Ungewissheit bzgl. der Langzeitstabilität einen Risikofaktor dar. In größeren Speicherklassen (>100 kWh bis 1 MWh) kann die RFB daher heute schon einen Business Case darstellen, wenn sie unter Berücksichtigung der Faktenlage zur Lebensdauer entsprechend genutzt wird. In kleineren (<100 kWh) Klassen und für den Privathaushalt ist sie daher aber (noch) nicht denkbar, ebenso steigt das Risiko bei hohen Speicherklassen (>>1 MWh) durch die hohen Investitionen. Kosten und Lebensdauer sollten daher (mit besonderem Blick auf die kalendarische Lebensdauer als Schlüsselparameter) künftig beobachtet und neu bewertet werden.

Umgebungsbedingungen

Bei den Umgebungsbedingungen ist die Pb robuster, weniger temperaturempfindlich und damit auch sicherer im Betrieb.

Sicherheit

Das aktuelle Referenzsystem, die Pb ist sehr sicher. Ebenso sicher sind Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd), deren Einsatz aber mehr und mehr eingeschränkt wird. Die aufkommende Alternative der LFP/LTO-Systeme ist bis auf den flüssigen Elektrolyten auch relativ sicher, wofür bereits Alternativen erforscht werden, nicht entflammbare Elektrolyte auf Festkörper- oder Gelbasis zum Beispiel. Die Elektrolyte könnten kurzfristig zur Verfügung stehen, womit die Batterien bis 2020 verfügbar werden. Hinsichtlich der Hauspeicher müssen die Energiespeicher intrinsisch sicher sein, weshalb Brandgefahr nicht akzeptabel ist.

Volumetrische Energiedichte und Leistungsdichte

Für beide Leistungsparameter ist die LIB Referenztechnologie. Bezüglich der volumetrischen Energiedichte gibt es allerdings die Möglichkeit der Weiterentwicklung von LFP/LTO-Systemen (LMO-Kathoden haben z. B. eine geringere Neigung zum „thermal runaway“ – im Verhältnis zu NCA- oder NMC-Kathoden – bei geringfügig höherer Energiedichte, dafür sind sie hinsichtlich anderer Leistungsparameter schlechter). Sie sind schon heute/kurzfristig verfügbar, mit höherer volumetrischer Energiedichte bei gleich hoher Sicherheit – bieten aber keine dramatische Verbesserung, denn ihre Leistungsfähigkeit ist schon weit ausgereizt. Damit einher geht aber ein positiver Kosteneffekt.

Langfristig wird eine Neubewertung hinsichtlich Na-basierter Niedrig-Temperatur-Systeme notwendig sein (weniger Abwärmeverluste, ggf. auch höhere Lebensdauer – aber nicht bis zu zehn Jahre, Korrosionsverluste bleiben gleich) wie auch hinsichtlich der FuE der sogenannten „Post-LIB“ bzw. Lithium-basierter Energiespeicher (Li-S mit zwar geringer Leistungsdichte, aber günstigem Preis) bzw. Metall-Luft-Systeme. Ggf. werden bis dahin auch andere Systeme wieder relevant (z. B. ZEBRA-Batterie, hat bereits heute zehn Jahre kalendarische Lebensdauer). Beide Leistungsparameter stellen allerdings keine Schlüsselparameter dar für diesen Anwendungsfall dar.

Stand der Marktentwicklung in Deutschland und Wirtschaftlichkeit der PV-Batteriesysteme

Bezüglich A1: Dezentrale, netzgekoppelte PV-Batteriesysteme zur Eigenbedarfsoptimierung waren Pb und LIB bislang zu ähnlichen Teilen Referenztechnologie (in Deutschland dominiert die LIB jedoch bereits). Dies zeigt eine Auswertung über die rund 60 Systemanbieter von PV-Hausbatterien in Deutschland auf Basis mehrerer Datentabellen.^{5,6,7} Bereits heute vertreiben demnach die Hälfte der deutschen Anbieter LFP/Graphit basierte

LIB, weniger als 20 Prozent bieten LIB mit NMC-, NCA-, LCO-, LMO-Kathoden sowie LFP-Batterien mit LTO-Anoden an. Damit werden nur noch von einem Drittel der Anbieter Pb-Batterien als Lösung angeboten. Bezogen auf die rund 340 individuellen Systemlösungen werden in rund 60 Prozent der Systeme LFP/Graphit-basierte LIB, in weniger als 20 Prozent LIB mit NMC-, NCA-, LCO-, LMO-Kathoden sowie LFP-Batterien mit LTO-Anoden eingesetzt. Somit finden Pb fast nur noch in einem von vier oder fünf verkauften Systemen Einsatz.

Eine Abschätzung auf Basis der rund 10 000–13 000 in Deutschland in 2013 verkauften PV-Batteriesysteme⁸ ergibt einen Marktanteil der Pb von rund 25 Prozent. Die LIB wird aufgrund der kurzfristigen Kostenentwicklung und bereits gegebenen Lebensdauer (20 Jahre für PV-Anlagen, 10 und mehr Jahre für Haushaltsbatterien) die Pb in den kommenden Jahren vermutlich noch weiter verdrängen.

Bei einer Auslegung der Systeme auf typischerweise 5–10 kWh Nutzkapazität (die gesamte Spanne des Angebots liegt bei rund 1–50 kWh) und bei durchschnittlichen Kosten von 1000–2000 €/kWh (die Spannweite reicht von 500 € bis einigen Tsd. € pro kWh) liegen die Investitionen für die Batterien heute bei durchschnittlich rund 5000–20 000 €. Der Markt in Deutschland lag daher vermutlich in 2013 bei über 100 Mio € bzw. 50–100 MWh (nur die Batteriesysteme, nicht PV Anlagen und geschätzter Mittelwert).

Erwartungen für die kommenden Jahre gehen von einem möglichen kurzfristigen Absatz von ~100 000 Systemen aus, wobei ein deutlicher Anstieg des Absatzes gerade im Ausland erwartet wird.⁹ In Deutschland dürfte die Entwicklung irgendwo da zwischen (ggf. rund 40 000 Systeme jährlich) liegen.

Betrachtet man die über die Lebensdauer des Systems ausgespeicherte Energie, so können die Kosten für die Investition letztlich mit den Elektrizitätskosten pro kWh verglichen werden. Unter der Annahme der Ausnutzung der maximal mit der jeweiligen Technologie nutzbaren Zyklenzahl¹⁰ zeigt sich, dass die Systeme bereits heute im Bereich der Elektrizitätskosten für Haushaltsstrom liegen können.

Dies soll jedoch eine vereinfachte Abschätzung darstellen und die relativen Unterschiede der elektrochemischen Energiespeicher aufzeigen. Die Berechnung berücksichtigt hierbei mehrere Punkte nicht:

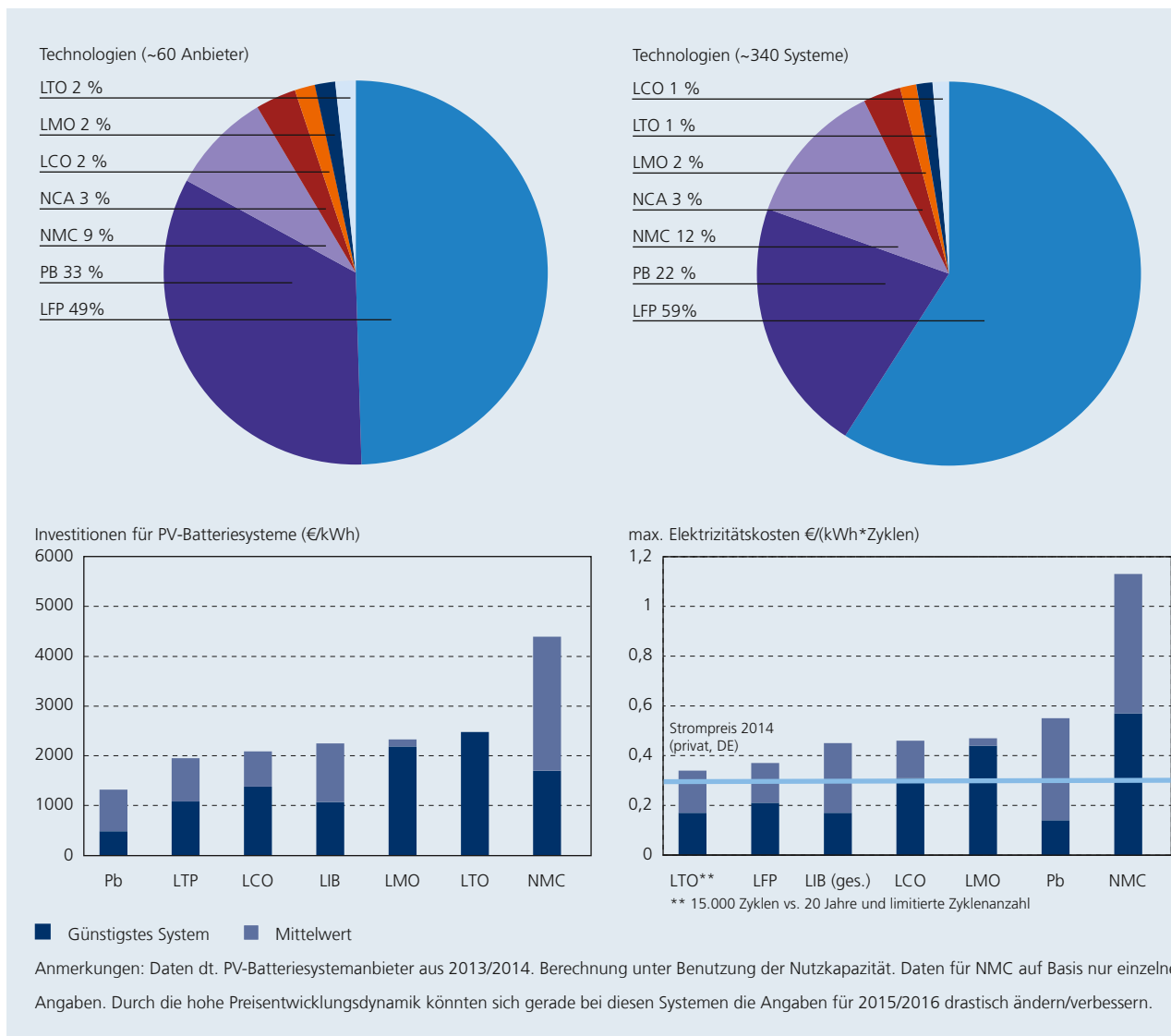
Weitere Kosten für die gesamte PV-Batterieanlage (z. B. inklusive PV-System), Anschluss, Wartung, Betrieb etc. sind nicht enthalten und umgelegt und würden die Ergebnisse verschlechtern.

Das Nutzungsprofil für diese Anwendungen ist komplexer und neben Zyklen pro Tag sind auch die Entladezeit, Entladetiefe etc. einzubeziehen. Dabei können 3000 bis 5000 Zyklen für diese Anwendung durchaus ausreichend sein. 15 000 Zyklen einer LFP/LTO Batterie werden daher ggf. gar nicht benötigt. Der Vorteil der LFP/LTO-Technologie ist daher vielmehr auch in der Kombination mit einer langen kalendarischen Lebensdauer und daher Nutzungsdauer zu sehen sowie evtl. der Kombination mehrerer Nutzungsfälle.

LCOE-Berechnungen (zwar ohne Berücksichtigung der PV-Anlage, jedoch mit Berücksichtigung des Nutzungsprofils sowie der genannten diversen Kostenarten) sind in der „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ vorgestellt und ergeben aus heutiger Sicht noch einen Vorteil für die Pb. Dies wäre in der einfachen Betrachtung hier beispielsweise im Vergleich der jeweils günstigsten Zellchemie zu erkennen (selbst bei Umlegung auf die Zyklen). Durchschnittliche Werte der LCOE-Berechnungen in der Technologie-Roadmap und anderer Quellen¹¹ liegen

bei 0,25–0,45 €/kWh (Pb) und 0,30–0,70 €/kWh (LIB), also durch die weiteren umzulegenden Kosten insgesamt höher. Hingegen werden in LCOE Berechnungen oftmals noch zu hohe Kosten der Energiespeicher angenommen, welche sich deutlich dynamischer entwickelt haben. Die Ergebnisse der LCOE Berechnungen in der Technologie-Roadmap sind aber insgesamt in Übereinstimmung mit den hier dargestellten Ergebnissen.

Dies zeigt jedoch als weitere Problematik die hohe Sensitivität der Berechnungen bzgl. der eingehenden Preisannahmen (neben bereits genannten Faktoren wie Zyklen, kalendarischer Lebensdauer, Nutzungsprofil etc.). Diese sind in der hier vereinfachten Rechnung ausnahmsweise tatsächlich miteinander vergleichbar, da ganz konkret Endkundenpreise über klar definierte Systeme deutscher Anbieter verglichen werden. Jedoch werden gerade die (Zell-)Preise (Investitionen, kWh) in den kommenden Jahren für NMC/NCA-basierte HE-LIB für automobiler Anwendungen nach Erwartung deutlich sinken und das Bild (z. B. für die hier als zu teuer eingestufte NMC-Technologie) ändern.



Die Darstellungen sollten daher vielmehr als Vergleich der einzelnen elektrochemischen Speichertypen dienen und nicht als Wirtschaftlichkeitsberechnungen direkt auf die Haushaltsstrompreise bezogen werden (obgleich sie vermutlich nicht weit weg von der realen Wirtschaftlichkeit liegen). Denn die Berechnungen zeigen auch, dass eine Netzparität (Grid Parity) bereits heute praktisch schon erreicht ist.

Deutlich detailliertere Berechnungen unter Einbezug aller genannten Punkte sowie einer Abschätzung, wie sich Preise bzw. Preisgefüge (z. B. Material, Komponenten, Zelle, Modul, System, Endanwender) in Zukunft für diese einzelnen Batterietypen entwickeln werden, wären hierzu wünschenswert bzw. notwendig. Auch müssten zukünftige Berechnungen zunehmend die Nutzung in mehreren Anwendungen (sogenanntes „Multi-purpose design“) wie in Anwendungsfall 2 beschrieben berücksichtigen und könnten zu anderen, d. h. deutlich besseren Ergebnissen führen.

PV Batteriesysteme in Deutschland

Links oben: Anteil der rund 60 deutschen Systemanbieter von PV-Batterien zur Eigenbedarfsoptimierung, welche Batterien eines entsprechenden Typs anbieten (67 Prozent der Anbieter verkaufen LIB, 33 Prozent verkaufen Pb-Batterien, zu beachten ist, dass viele Anbieter LIB und Pb-Batterien über etwa 340 Systeme hinweg anbieten).

Rechts oben: Anteil der rund 340 PV-Batteriesysteme (der ca. 60 Anbieter in Deutschland) mit jeweiliger Batterie eines Typs (in 78 Prozent der Systeme werden LIB und in 22 Prozent der Systeme Pb-Batterien eingesetzt).

Links unten: Investitionen (Durchschnitt und günstigste Angebote) für PV-Batteriesysteme deutscher Anbieter in €/kWh. Die Preise sind Endkundenpreise für das Batteriesysteme (ohne PV Anlage) in 2014 und bezogen auf die Nutzkapazität.

Rechts unten: Umgelegte Batteriekosten auf die mit der jeweiligen Technologie realisierbaren Zyklenzahl (für LFP/LTO wird bei maximal 20 Jahren Lebensdauer abgeschnitten und nicht auf 15 000 Zyklen umgelegt, siehe Text). Die Kosten liegen heute bereits im Bereich der Haushaltsstromkosten.

A2: MULTI-PURPOSE EIGENBEDARFS-OPTIMIERUNG & PEAK SHAVING

Größenklasse

Mehr als 100 kW bis 1 MW („Batterie-Container“).

Referenztechnologie

Lithium-Ionen-Batterien (LIB), Blei-Säure-Batterien (Pb) (ungefähr 70 Prozent vs. 30 Prozent).

Hinsichtlich Energieanwendungen muss zwischen Anwendungsfall eins und zwei kein Unterschied gemacht werden. Leistungsanwendungen beziehen sich z. B. auf das Peak Shaving. In diesem Anwendungsfall verläuft die Trennungslinie daher zwischen Energie- und Leistungsanwendungen (z. B. passen die RFB nicht ganz zum „Peak Shaving“). Während A1 („PV-Batteriesysteme“) eine Energie-Anwendung darstellt, entsprechen A3 („Direktvermarktung“) und A4 („Regelleistung“) Leistungs-Anwendungen.

Leistungsparameter

Kosten

Hier ist festzuhalten, dass für Anwendungsfall eins eher die Investitionskosten (für Privathaushalte) im Vordergrund stehen, in Anwendungsfall zwei zählen vor allem die Kosten pro ausgespeicherter kWh (für die Industrie). Damit verschiebt sich der Vorteil hin zur LIB. Die Energiespeicher werden für die Industrie früher lohnenswert, wenn die Betriebskosten (trotz ggf. schlechterer Zyklen-Festigkeit oder mehr Wartungsaufwand) entsprechend niedriger ausfallen. Der „Multi-purpose“-Aspekt sorgt dafür, dass der Energiespeicher-Einsatz früher wirtschaftlich wird. Schwierig fällt dennoch eine Festlegung auf die konkrete Auslegung der Energiespeichersysteme, da sie anders als in Anwendungsfall eins von Fall zu Fall sehr unterschiedlich aussehen (neue Lastkurven, neues Verhältnis zwischen Leistung zu Arbeit) und u. a. höhere Engineering-Kosten mit sich bringen. Die Kosten pro ausgespeicherter kWh beinhalten alle Kosten bis zum finalen Verschleiß, was auch kalkulatorische Zinsen etc. umfasst.

Referenztechnologie bzgl. Investitionen ist dennoch die Pb. Der spezifische Anwendungsfall bringt aber einen Größenvorteil mit sich, der Kostenentwicklungsziele für LIB früher erreichbar erscheinen lässt. Die LIB wird deshalb früher an Attraktivität gewinnen und in dieser Anwendung diffundieren. Hier sind aber auch die Engineering-Kosten bei einer industriellen Anwendung deutlich höher, auch wenn die spezifischen Kosten des Batteriesystems vielleicht geringer sind als in Anwendungsfall eins. Zur Vereinfachung wird daher bei den Investitionen davon ausgegangen, dass es sich um eine verkaufsfertige Lösung handelt.

ZEIT →		2015		KURZFRISTIG		
A2: Multi-Purpose Eigenbedarfsoptimierung & Peak Shaving		Markt- und Technologievorbereitung	Multi-Purpose Eigenbed. & Peak Shaving (100 kW - 1 MW)	Markthochlauf	Multi-Purpose Eigenbed. & Peak Shaving (>5 MW)	
TECHNOLOGIEEIGENSCHAFTEN VS. MARKTANFORDERUNGEN	Kosten	Pro ausgespeicherter kWh/Betrieb	Energieanw.: LIB, Pb Leist.anw.: LIB	Markthochlauf & Diffusion		
		Investition	Leist.anw.: Pb	Markthochlauf & Diffusion		
	Wirkungsgrad		LIB			
	Lebensdauer	Kalendarisch	LIB	Markthochlauf	LFP/LTO (20 Jahre)	
		Zyklisch	LIB	Markthochlauf	LFP/LTO (15.000-20.000)	
	Umgebungsbedingungen (Temperatur)		Pb			
	Sicherheit		PB, LIB (LTO)	Markthochlauf & Diffusion		
	Volumetrische Energiedichte		LIB	Markthochlauf	LFP/LTO (geringe Verbess.; mit LiMnPO ₄)	
	Volumetrische Leistungsdichte		LIB			
	Energiesp. für 50-100 €/kWh als möglicher game changer		LIB, Pb	Markthochlauf & Diffusion		

Andere kostengünstige Speicher wären z.B. Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd). Diese werden heute höchstens noch in reinen Industrie-Anwendungen genutzt. Ihre Vorteile liegen in der Eignung unter extremen Umgebungsbedingungen, sowohl sehr niedrige als auch sehr hohe Temperaturen, und der Sicherheit. Sie bringen eine extreme Zuverlässigkeit, eine hohe Entladungstiefe und hohe Leistungsfähigkeit mit. Ein Problem liegt aber in der Rohstoffversorgung bzgl. Cadmium. Extreme Anforderungen stellt Anwendungsfall zwei allerdings nicht, weshalb LIB einzig gewisse Kostenziele erreichen müssen, um sich durchzusetzen

Bzgl. der Investitionskosten wird die RFB mit zunehmender Größe (von Anwendungsfall zu Anwendungsfall) konkurrenzfähig. Wie in Anwendungsfall 1 sind sie auch hier jenseits 2020 erneut zu bewerten. Im industriellen Umfeld könnten sie sich dennoch leichter durchsetzen.

Wirkungsgrad

Entsprechend Anwendungsfall 1.

Lebensdauer kalendarisch/zyklisch

Entsprechend Anwendungsfall 1 bzw. hat die LTO-Batterie in diesem Anwendungsfall sogar noch bessere Chancen.

Umgebungsbedingungen

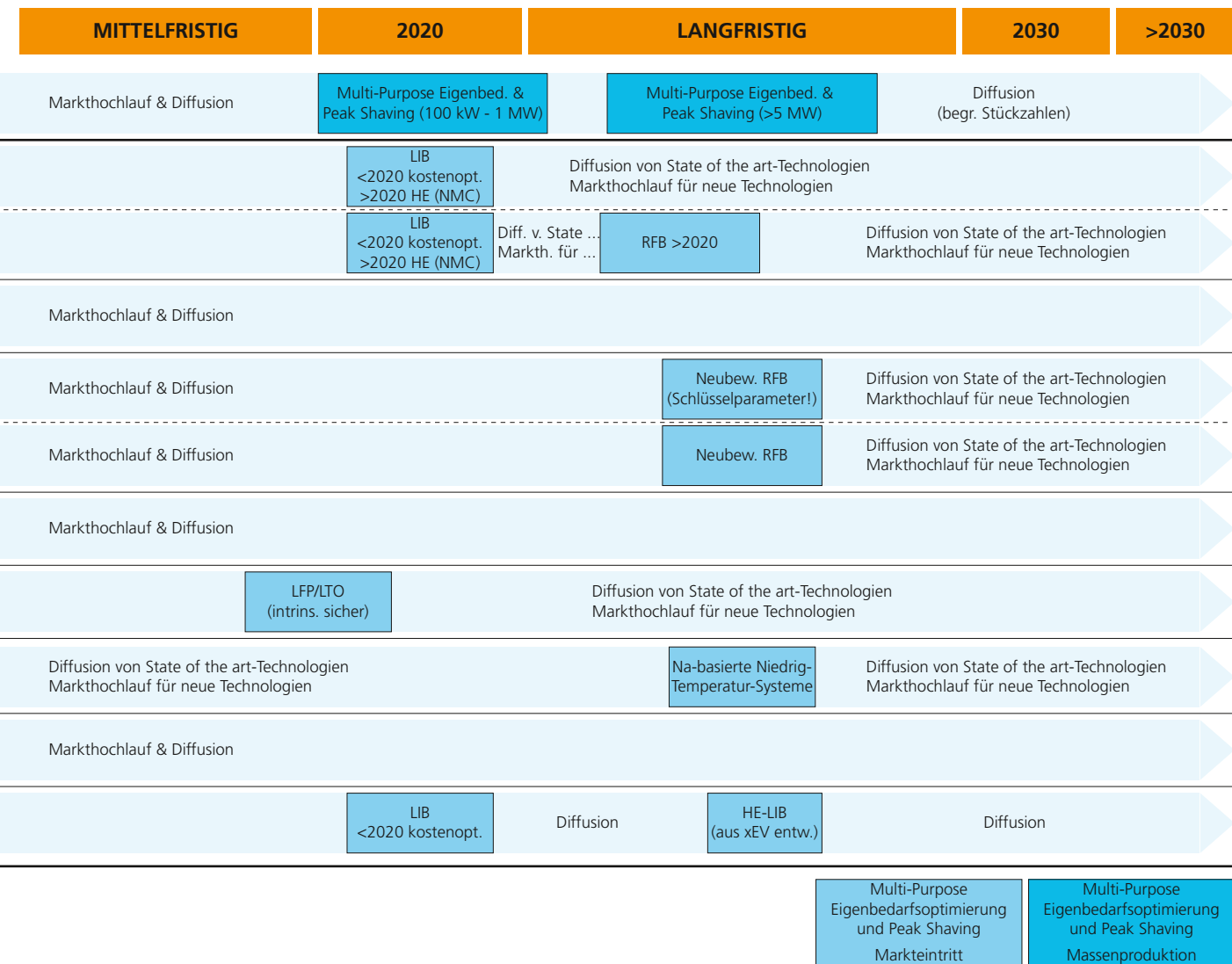
Entsprechend Anwendungsfall 1.

Sicherheit

Entsprechend Anwendungsfall 1.

Volumetrische Energiedichte und Leistungsdichte

Entsprechend Anwendungsfall 1.



A3: DIREKTVERMARKTUNG ERNEUERBARER ENERGIEN

Größenklasse

Deutlich mehr als 1 MW, „größere PV bzw. Windkraftwerke“.

Referenztechnologie

LIB (für „Viertelstunde“ in der PV), NaS-, ZEBRA-Batterien, RFB (für „Stunden bis Tage“ in Windenergie).

Hier wird zwischen erneuerbarer Energieerzeugung mit PV- und Windkraftanlagen unterschieden. Bzgl. der PV ist die LIB-Referenztechnologie, bzgl. der Sicherheit sind insbesondere LTO-Batterien im Vorteil. Bzgl. der Windenergie ist die NaS Referenztechnologie (insbesondere werden bei der zyklischen Lebensdauer heute 4500 Zyklen mit immer noch 80 Prozent der ursprünglichen Kapazität erreicht, Anbieter ist NGK aus Japan).

In einem größeren PV-Park (MW-Bereich) reicht für einen Wolken-durchzug von einer Viertelstunde eine 250 kW-LIB. NaS eignen sich eher für Windparks und größere MW Auslegung, wo Flauten von zwei bis drei Tagen anhalten können. Dort können auch die RFB oder ZEBRA-Batterie zum Einsatz kommen.

Mittel- bis langfristig kann auch die Wasserstoffspeicherung (mit Elektrolyse) in Kraftwerken mit mehreren MW (Größenordnung „zehn“) an Bedeutung gewinnen. Dies ist noch nicht der Bereich saisonaler Speicher, aber behandelt die Fragestellung, wie der aus Windparks zwischengespeicherte (Überschuss-)Strom vermarktet wird. Dies wäre für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft und die Versorgung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen (FCEV) relevant.

Kleine Systeme im PV-Bereich sind bereits heute verfügbar, der Markteintritt im breiteren Sinne wird mittelfristig erfolgen.

ZEIT →		2015		KURZFRISTIG		
A3: Direktvermarktung erneuerbarer Energien		Markt- und Technologievorbereitung		Direktvermarktung erneuerbarer Energien	Markthochlauf	
TECHNOLOGIEEIGENSCHAFTEN VS. MARKTANFORDERUNGEN	Kosten	Pro ausgespeicherter kWh/Betrieb	PV: LIB, Wind:NaS	Markthochlauf		
		Investition	PV: LIB, Wind:NaS	Markthochlauf	Adiab. Druckluftspeicher Markthochlauf	
	Wirkungsgrad		PV: LIB, Wind:NaS	Markthochlauf		
	Lebensdauer	Kalendarisch	PV: LIB, Wind:NaS	Markthochlauf	LFP/LTO (20 Jahre)	Markthochlauf
		Zyklisch	PV: LIB, Wind:NaS	Markthochlauf	LFP/LTO (15.000-20.000)	Markthochlauf
	Umgebungsbedingungen (Temperatur)		PV: LIB, Wind:NaS	Markthochlauf		
	Sicherheit		PV: LIB (LTO), Wind:NaS	Markthochlauf & Diffusion		
	Volumetrische Energiedichte		PV: LIB, Wind:NaS	Markthochlauf		
	Volumetrische Leistungsdichte		PV: LIB, Wind:NaS	Markthochlauf		
	Energiesp. für 50-100 €/kWh als möglicher game changer		PV: LIB, Wind:NaS	Markthochlauf	Markthochlauf	

Leistungsparameter

Zu unterscheiden ist (für die Speicherklasse mit $\gg 1$ MW) zwischen der LIB als Referenztechnologie für PV (Minuten-Speicherung) und NaS-Batterie im Wind-Bereich (Stunden-Speicherung). Die NaS-Containerlösungen für Windkraftanlagen speichern 6 Stunden, es gibt das Submodul mit 250 kWh, 4500 Zyklen, 70 bis 80 Prozent Entladungstiefe (engl. „depth of discharge“, Abkürzung DOD), aber verkauft werden mindestens 2 MWh. Hier werden LIB vermutlich zunächst nicht konkurrieren können.

Kosten

Als mögliche Konkurrenztechnologien zu NaS-Systemen werden im Bereich der Kosten Niedrig-Temperatur-Technologien gesehen, welche aber noch nicht weit genug entwickelt sind.

Adiabatische Druckluftspeicher könnten kurzfristig hinsichtlich der Investitionen und mittelfristig unter Betrachtung der Kosten pro ausgespeicherter kWh attraktiv werden (Herausforderung bzgl. des geringeren Wirkungsgrads).

LIB könnten schon kurzfristig wirtschaftlich für diese Anwendung werden.

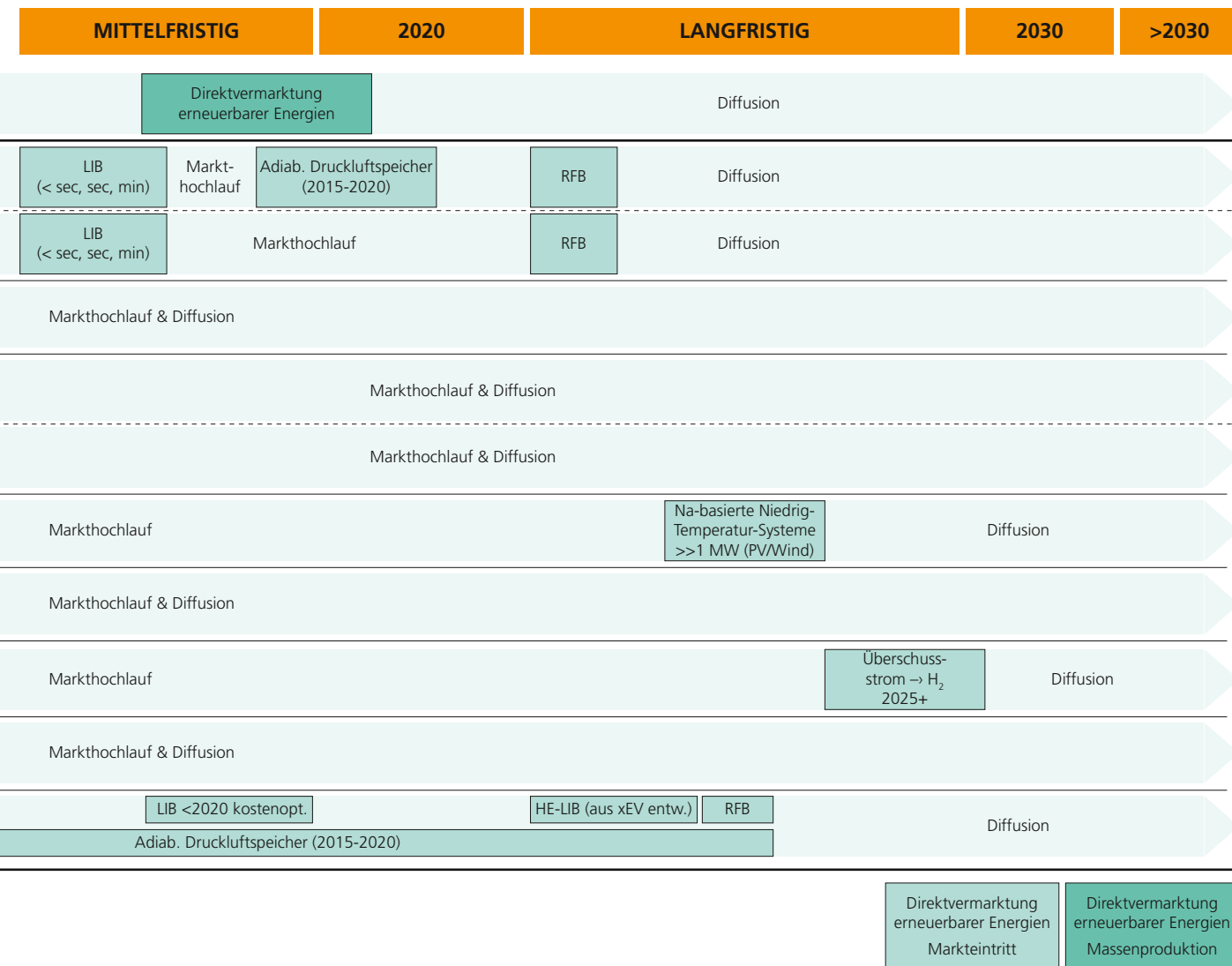
Auch die RFB kann ab dem Jahr 2020 eine große Konkurrenztechnologie darstellen (ca. 300 €/kWh für Vanadium, in RFB sind 60 €/kWh erreichbar inklusive Herstellung des Elektrolyten plus Schwefelsäure – teuer ist im Moment der Energiewandler).

Wirkungsgrad

Entsprechend Anwendungsfall 1 und 2.

Lebensdauer kalendarisch/zyklisch

Entsprechend Anwendungsfall 1 und 2.



Sicherheit

LIB, ansonsten entsprechend Anwendungsfall 1 und 2.

Umgebungsbedingungen

Alle Na-basierten Systeme arbeiten bei hohen Betriebstemperaturen (270-350°C) und müssen geheizt werden. Na-basierte Niedrig-Temperatur-Systeme wären eine Verbesserung und attraktive langfristige Lösung im Bereich >>1MW. Dies gilt für große Anlagen, sowohl in der PV als auch der Windkraft.

Volumetrische Energie- und Leistungsdichte

Das Thema „Wasserstoffspeicherung“ spielt hier ggf. langfristig (Power-to-Gas-Technologien) eine Rolle, um Überschussstrom zu speichern. Hinsichtlich der volumetrischen Energiedichte ergäbe sich ein Vorteil.

ZEIT →		2015				KURZFRISTIG	
A4: Regelleistung		Markt- und Technologievorbereitung		Regelleistung	Markthochlauf		
TECHNOLOGIEEIGENSCHAFTEN VS. MARKTANFORDERUNGEN	Kosten	Pro ausgespeicherter kWh/Betrieb	Rot. Masse (< sec) Prozessst. (sec) Pumpsp. (min)	Markthochlauf			
		Investition	Rot. Masse (< sec) Prozessst. (sec) Pumpsp. (min)	Markthochlauf			
	Wirkungsgrad		Rot. Masse (< sec) Prozessst. (sec) Pumpsp. (min)	Markthochlauf	Supercaps (< sec)	Schwungrad (< sec, sec)	Markthochlauf
	Lebensdauer	Kalendarisch	Rot. Masse (< sec) Prozessst. (sec) Pumpsp. (min)	Markthochlauf	Supercaps (< sec)	Schwungrad (< sec, sec)	Markthochlauf
		Zyklisch	Rot. Masse (< sec) Prozessst. (sec) Pumpsp. (min)	Markthochlauf	Supercaps (< sec)	Schwungrad (< sec, sec)	Markthochlauf
	Umgebungsbedingungen (Temperatur)		Rot. Masse (< sec) Prozessst. (sec) Pumpsp. (min)				
	Sicherheit		Rot. Masse (< sec) Prozessst. (sec) Pumpsp. (min)				
	Volumetrische Energiedichte		Rot. Masse (< sec) Prozessst. (sec) Pumpsp. (min)				
	Volumetrische Leistungsdichte		Rot. Masse (< sec) Prozessst. (sec) Pumpsp. (min)	Markthochlauf	Supercaps (< sec)	Schwungrad (< sec, sec)	Markthochlauf
	Energiesp. für 50-100 €/kWh als möglicher game changer		Rot. Masse (< sec) Prozessst. (sec) Pumpsp. (min)	Markthochlauf & Diffusion			

A4: REGELLEISTUNG

Größenklasse

Mehr als 1 MW.

Referenztechnologie

Rotierende Massen (für die Subsekunden-Reserve), Prozesssteuerung im Kraftwerk (für die Sekunden-Reserve), Pumpspeicher (für die Minuten-Reserve). Die (Sub)-Sekunden-Reserve ist deutlich günstiger als die Minutenreserve, beide nehmen aber am Markt teil.

Weitere Alternativen umfassen Super-Caps (im Subsekundenbereich), das Schwungrad (bis Sekundenbereich), Lithium-Caps (Li-Caps) (Subsekunden) und LIB, sowohl in der (Sub)-Sekunden- als auch in der Minutenreserve). Im Sekundärbereich kommen

auch Blockheizkraftwerke (BHKW) in Frage, z. B. in der Minutenreserve von Inselnetzen.

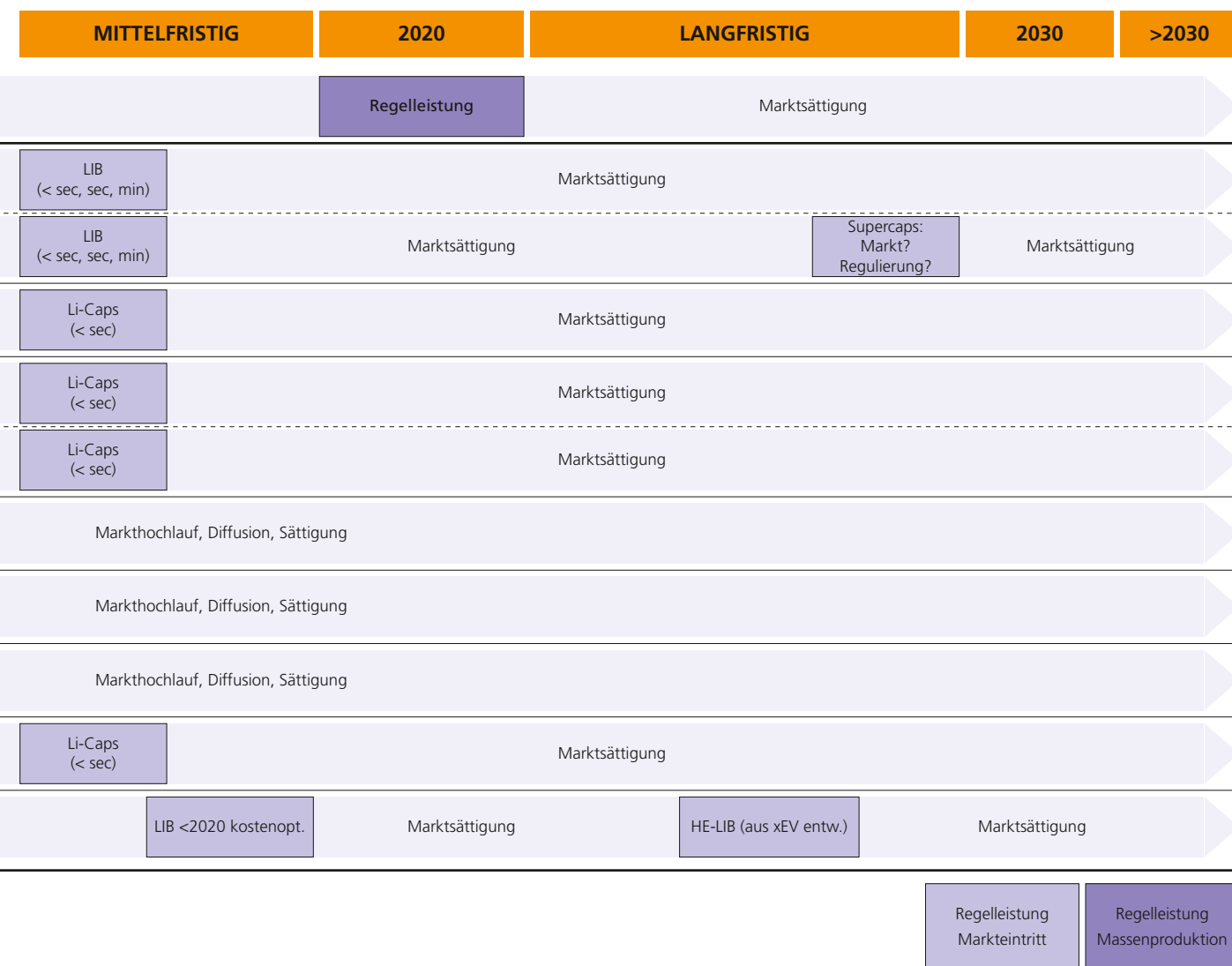
Leistungsparameter

Kosten

Wie auch in Anwendungsfall 3 können LIB schon kurzfristig wirtschaftlich für diese Anwendung werden. Supercaps könnten rotierende Massen (Subsekundenbereich) ab dem Jahr 2030 ersetzen, aber dies ist eine Markt- bzw. Regulierungsfrage und in Abhängigkeit der Netzstabilität zu sehen.

Wirkungsgrad

Supercaps und Schwungräder sind hier konkurrenzfähig, Li-Caps kurz- bis mittelfristig.



Lebensdauer kalendarisch/zyklisch

Supercaps und Schwungräder sind hier konkurrenzfähig, Li-Caps kurz- bis mittelfristig

Sicherheit

Schwungräder werden bzgl. der Sicherheit eher kritisch gesehen, hier gibt es ggf. Akzeptanzprobleme. In den etablierten Lösungen ist der heutige Standard bereits ausreichend und im Vergleich zu Anwendungsfall 1 oder 2 z.B. als deutlich weniger kritisch einzustufen.

Volumetrische Leistungsdichte

Supercaps und Schwungräder sind hier konkurrenzfähig, Li-Caps kurz- bis mittelfristig.

Volumetrische Energiedichte

Besonders hinsichtlich der volumetrischen Energiedichte sind Supercaps eher schlecht, Lithium-Kondensatoren als Nachfolger besser, aber noch immer relativ teuer und deutlich schlechter als manche Batterietechnologie.

RAHMENBEDINGUNGEN

Für die Marktentwicklung und Verbreitung der Technologien in den vier Anwendungsfällen können nicht-technische Rahmenbedingungen fördernd aber auch hemmend wirken. Dies muss nicht in gleicher Weise für alle Anwendungen gelten und kann daher spezifisch variieren. Hinsichtlich Regulierung und Förderung, Infrastruktur, Gesellschaftliche/Kundenakzeptanz werden daher anwendungsbezogene Rahmenbedingungen diskutiert.

REGULIERUNG UND FÖRDERUNG

Finanzielle Anreize z. B. im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes wirken sich grundsätzlich fördernd für die Marktentwicklung von Energiespeichern aus, wenn sie zum Ausbau von Photovoltaik (PV) führen. Auch die Kraft-Wärme-Kopplung könnte davon profitieren, wie alle Anwendungsfälle 1 bis 3. Die EEG-Novellierung zum 1. August 2014 berücksichtigte „Energiespeicher“ allerdings nicht.¹² Die nächste Novelle wird für das Jahr 2016 erwartet. Finanzielle Anreize wurden nur für Anwendungsfall 1 geschaffen, als ein **Marktanreizprogramm** für PV-Energiespeicher und Investitionszuschüsse rückwirkend zum 1. Januar 2013 eingerichtet¹³ und zum 1. April 2015 novelliert wurde¹⁴. Marktanreizprogramme im Allgemeinen werden aber durchaus kontrovers diskutiert, denn der Strompreis z. B. stellt eigentlich einen Marktanreiz dar, über den es ggf. auch zum flächendeckenden Einsatz von Energiespeichern kommen könnte. Finanzielle Anreize für die Anwendungsfälle 2 bis 4 könnten auch durch die neuerliche EEG-Novelle eingerichtet werden, sie würden sich förderlich auf die Marktentwicklung von Energiespeichern auswirken.

Die **Kompensation für Systemdienstleistungen** wirkt sich allerdings hemmend aus, weil sie Investitionen in neue Systemtechnik wie z. B. Energiespeicher in den besprochenen Anwendungsfällen behindert. Die Anpassung von Regularien für Systemdienstleistungen zum Erhalt der Netzstabilität ist dringend notwendig¹⁵ und wird spätestens mittelfristig erwartet. Durch neue Regularien sollen (Reserve-)Energiespeicher insofern begünstigt werden, als dass anders als in den aktuellen Regularien ein Energiespeicher nicht mehr nur Kurzzeitspeicher sein

kann, denn für manche Bedarfe sind auch Mittelfrist- und Langzeitspeicher erforderlich. Deshalb handelt es sich bei der Anpassung der Regularien um einen förderlichen Aspekt. Erneuerbare Energien können technisch schon heute wichtige Systemdienstleistungen erbringen, die Rahmenbedingungen zur Markt- und Systemintegration müssen dafür aber angepasst werden.¹⁶

Die **Förderung von FuE** mit dem Schwerpunkt der Markteinführung und eine Start-Up-Förderung im Bereich der stationären Energiespeicher zielen auf die schnelle Realisierung neuer Energiespeicherkonzepte am Markt hin, um eine zügige Marktentwicklung zu realisieren. F&E-Förderprogramme gibt es bereits heute explizit für stationäre Energiespeicher, sowohl auf Bundes- als auch auf Landesebene, die **Start-Up-Förderung** läuft eher allgemein unter Aktivitäten und Fördermaßnahmen zur Existenzgründerförderung. Insbesondere die Förderung von Start-Ups im Energiespeicherbereich wäre hinsichtlich einer förderlichen Wirkung zu überdenken, da z. B. im Vergleich zum amerikanischen Fördersystem Potenziale nicht realisiert werden. Mit den richtigen Anreizen könnte hier ein förderlicher Impuls für die Marktentwicklung von Energiespeichern entstehen.

Die **steigende Erfahrung bzgl. des Energiespeicher-Transports** in Herstellung und Logistik könnte dafür sorgen, dass entweder die Transportvorschriften gelockert werden oder sie kein großes Hindernis mehr darstellen. Dieser Aspekt dürfte bereits kurzfristig eine große Rolle spielen, wenn in der Elektromobilität ein größeres Marktvolumen erreicht wird und betrifft alle vier Anwendungsfälle für stationäre Energiespeicher. Lithium-Ionen-Batterien (LIB) unterliegen in Deutschland der Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern (GGVSEB) und werden europaweit in der in den Anlagen A und B des Europäischen Übereinkommens über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) geregelt.¹⁷ Auch für den Lufttransport gibt es mittlerweile Richtlinien, die von der International Civil Aviation Organization (ICAO) und der International Air Transport Association (IATA) veröffentlicht wurden.¹⁸

Die Bereitstellung von **Regelleistung aus einem Pool** wird sich auf stationäre Energiespeicher im Anwendungsfall 4 aufgrund seiner preissenkenden Wirkung mittelfristig positiv sowohl auf die Akzeptanz als auch auf die Verbreitung auswirken. Unklarheit besteht noch hinsichtlich der Geschäftsmodelle von Energieversorgungsunternehmen, ob sie ihre Leistung in Kilowatt oder Kilowattstunden abrechnen werden. Durch die **Anpassung der Transmission codes** und die damit verbundene Berücksichtigung neuer Technologien könnten Energiespeichertechnologien profitieren, welche bei beschränkter Speicherkapazität im Stromnetz zum Einsatz kommen könnten und bisher gegenüber konventionellen Systemen benachteiligt sind.

Sollte sich H₂ als Speicher mit langen Speicherzeiten und einem hohen/höheren Wirkungsgrad von Brennstoffzellen (BZ, z. B. alkalische oder Hochtemperatur-BZ) durchsetzen, würde sich das hemmend auf alle vier Batterie-Anwendungsfälle auswirken. Gleichzeitig dürfte auch die Akzeptanz H₂-basierter Technologien steigen bzw. wäre durch Information der Öffentlichkeit über die Technologie sicherzustellen. Wenn die Aktivitäten und Strukturen ausgebaut werden, erfahren H₂-basierte Technologien eine größere Aufmerksamkeit, was im Bereich der Elektromobilität mit dem Toyota Mirai der Toyota Motor Corporation als erstem Elektromobil-Hersteller mit einem auf der Straße erleb- baren Brennstoffzellen-Fahrzeug (jenseits von Pilotprojekten) bereits begonnen hat. Hier sind aber noch grundsätzliche Fragen einer „grünen“ Wasserstoffwirtschaft und -infrastruktur sowie deren regionalen Umsetzung offen und fallen ganz sicher in den Zeitraum jenseits 2020 bis 2030 (unter dem Aspekt Power to X).

Auch hinsichtlich der **CO₂-Gesetzgebung** (zuerst Fahrzeuge, dann Kraftwerke) besteht Handlungsbedarf: CO₂-Zertifikate sind im Moment deutlich zu günstig. Würde sich ihr Preis wieder erhöhen, wäre das ein starker Treiber für die Durchsetzung von stationären Energiespeichern in allen vier Anwendungsfällen, andernfalls könnte sich dieser Aspekt auch hemmend auswirken. Für die Elektromobilität spielt dieses Thema bereits heute eine zunehmend wichtige Rolle, im Bereich der stationären Energiespeicher langfristig bzw. nach dem Jahr 2020.

Ein entsprechendes **Marktdesign** für langfristig gesicherte Leistung könnte langfristig für einen breiten Markthochlauf von stationären Energiespeichern sorgen: Wird der Energiespeicher- ein- satz honoriert, wächst die Anzahl der eingesetzten Energiespeicher in allen vier Anwendungsfällen.

INFRASTRUKTUR

Der sich langsam abzeichnende **Trend zu lokaler/dezentra- ler Erzeugung** und Verbrauch mit kleineren Netzeinheiten ist ein förderlicher Aspekt für die Durchsetzung von Energiespei- chern in den Anwendungsfällen 1 und 2, denn der potenzielle Markt für Energiespeicher wächst nicht nur mit der Anzahl der Versorgungsunternehmen bzw. Stadtwerken, die einsteigen und den Betrieb von großen Kraftwerkseinheiten unrentabel machen, sondern auch mit der Anzahl von Privathaushalten, die ggf. energieautark werden möchten.

Die derzeitige **Preisbildung für „ausgespeicherte Energie“** wird dabei als Hemmnis für stationäre Energiespeicher empfunden, da keine transparente Regulierung vorliegt: Wer darf einen Energiespeicher im Stromnetz betreiben, und welche Kriterien sind dafür zu erfüllen? Benötigt wird dabei keine rein finanzielle Energiespeicherförderung, sondern ein klar definiertes, verlässliches Regelwerk.

Hinderlich wirken sich **H₂ als Speicher** auf die Anwendungsfälle 1 bis 3 aus, falls der auch in der Elektromobilität problematische Infrastrukturausbau zu lange auf sich warten lässt, die Kosten zu hoch bleiben und Technikentwicklungen stocken. Für das zu teure und in Brennstoffzellen als Katalysator eingesetzte Edel- metall Platin könnte z. B. durch entsprechende FuE Intensivie- rung weiter nach Substitutionsmöglichkeiten gesucht werden.

Eine **dauerhafte Abschaltung** von Kraftwerken wegen Unwirt- schaftlichkeit wird schon kurzfristig und über die nächsten Jahre hinweg ein beständiger Treiber für die Durchsetzung von stationären Energiespeichern in allen vier Anwendungsfällen sein.

Mit der zunehmenden **Normierung/Standardisierung** und der **Entwicklung von Geschäftsmodellen** für Energiespeicher- Anwendungen spielen zwei Aspekte sowohl im Infrastrukturbereich als auch für die Gesellschaftliche/Kundenakzeptanz für alle vier Anwendungsfälle eine große Rolle, die sich bei entspre- chender Entwicklung beide förderlich für die flächendeckende Verbreitung von Energiespeichern in Deutschland auswirken würden.

ZEIT →		2015				KURZFRISTIG	
ANWENDUNGSBEZOGENE RAHMENBEDINGUNGEN	Regulierung und Förderung	(Finanzielle) Anreize z. B. durch MAP (A1)	Kompensation für Systemdienstleist. (A1-4)	(Finanzielle) Anreize z. B. durch EEG-Novelle (A1-4)	FuE-Förderung (Markteinführung) (A1-4)	FuE-Förderung (Markteinführung) (A1-4)	Steig. Erfahrung bzgl. Energiespeicher-Transp. zur Herstellung und in Logistik (A1-4)
	Infrastruktur	Trend zu lokaler/dezentraler Erzeugung u. Verbrauch mit kleineren Netzeinheiten (A1-2)	Derzeit. Preisbildung f. „ausgespeicherte Energie“ (A3-4)	Normierung/Standardisierung (A1-4)	Entwicklung von Geschäftsmodellen für Energiespeicheranwendungen (A1-4)		H ₂ als Speicher Dauerhafte Abschaltungen
	Gesellschaftliche/Kundenakzeptanz	Versorgungssicherheit/Unabhängigkeit, USV-Systeme (A1-2)	Unsicherheit, keine langfristige Planung möglich (A1-4)				Brand eines Speichersystems z. B. im EFH (A1)

GESELLSCHAFTLICHE/KUNDEN- AKZEPTANZ

Für die Gesellschaftliche/Kundenakzeptanz sind **Versorgungssicherheit/Unabhängigkeit bzw. Autarkie** (unter anderem durch den Einsatz stationäre Energiespeicher in der unterbrechungsfreien Stromversorgung – USV) in den Anwendungsfällen 1 und 2 sehr wichtig. Versorgungssicherheit wird für Vertrauen bei Privathaushalten und Unternehmen in sorgen. Gerade durch Regulierung und Förderung könnte Planungssicherheit geschaffen (und hemmend wirkende Unsicherheiten abgebaut) werden.

Der **Brand eines Speichersystems** z. B. in einem Einfamilienhaus (EFH) in Anwendungsfall 1 wäre ein Horrorszenario für die Akzeptanz der Technologie, welches zeitbezogen jedoch nicht eingeordnet werden kann und deshalb ein fortlaufendes Risiko darstellt. Ein solcher spektakulärer Unfall könnte die Marktentwicklung von stationären Energiespeichern sehr stark hemmen, wobei auch entsprechende Vorkommnisse auf der Straße (Elektromobilität) ein Problem in der öffentlichen Wahrnehmung darstellen würden. Sicherheitsanforderungen stehen allerdings bei der Technologieentwicklung an erster Stelle, auch hier gilt es eine parallele Aufklärung der Öffentlichkeit mit Diffusion der Technologie nicht zu versäumen.

In demselben Sinn ist auch die **Akzeptanz der Hochtemperatur-NaS-Batterie** in Anwendungsfall 3 einzustufen, wobei hier auch weiterreichende Sicherheitsmaßnahmen möglich sind, anders als ggf. in einem EFH.

Eine **starke Entwicklung in der Elektromobilität** wirkt daher aus vielerlei Hinsicht als Treiber auf die Anwendungsfälle 1 bis 3, denn sie zieht eine Kostendegression bei Energiespeichern nach sich und wird positive Auswirkungen auf die stationären Anwendungen haben (auch bzgl. Information, Akzeptanz etc.). Wichtig ist allerdings die Unterscheidung nach Anwendungsfällen: Während die Anwendungsfälle 1 bis 3 davon profitieren, würde aufgrund des geringen Marktvolumens Anwendungsfall 4 (Regelenergiebereitstellung) einfach wegbrechen.

Probleme könnte neben der Rohstofffrage an sich auch in der öffentlichen Wahrnehmung die **Rohstoffverfügbarkeit** von Kobalt (Co), Nickel (Ni) etc. für die Anwendungsfälle 1 bis 3 darstellen, welche langfristig aufgrund von Verfügbarkeit oder politischer Instabilität ggf. nicht sichergestellt sein könnte. Auch die Toxizität der Zink/Brom-RFB sowie die Preisentwicklung von Vanadium-RFB könnte ein Problem darstellen.

MITTELFRISTIG		2020	LANGFRISTIG			2030	>2030
Regelleistung „aus Pool“ (A4)	Anpassung Transm. Codes: Berücks. neuer Technologien (A3-4)	H ₂ als Speicher (Speicherzeit, Wirkungsgrad) (A1-4)	CO ₂ -Gesetzgebung (zuerst Fahrzeuge, dann Kraftwerke) (A1-4)	Marktdesign für langfristig gesicherte Leistung (A1-4)			Sehr günstige Energiesp. mit 50-100 €/kWh Zellkosten als möglicher „game changer“ (A1-4), insbes. getrieben durch LIB in xEV
(Infrastruktur, Kosten für Pt-Kat) (A1-3)		von Kraftwerken wegen Unwirtschaftlichkeit (A1-4)					
NaS-Akzeptanz gering bzgl. Sicherheit (A3)		LIB-Erfolge in Elektromobilität (A1-4)	Rohstoffverfügbarkeit Co/Mn/Ni (A1-3)	Toxizität Zn/Br-RFB, VRFB-Preisentwicklung (A3)	Starke Entwicklung in Elektromobilität (A1-3)	Starke Entwicklung in Elektromobilität (A4)	
				Aspekt wirkt sich hemmend auf den jeweiligen Anwendungsfall aus	Aspekt wirkt sich förderlich für den jeweiligen Anwendungsfall aus	Faktor kann sich sowohl hemmend als auch förderlich auswirken	

POTENZIELLE GAME CHANGER (A1 BIS A4):

Zusammenfassend sind in allen vier Anwendungen bereits Energiespeicherlösungen etabliert, welche auch künftig von Bedeutung sind. Eine neue, alternative Lösung kann daher nur über eine deutliche Kostensenkung (ohne dabei andere Parameter zu verschlechtern) den Stand der Technik ablösen. Dies könnte insbesondere mit der für Elektrofahrzeuge optimierten LIB gelingen, sobald durch eine massive Nachfrage und daher großvolumige Produktion Skaleneffekte zu einem Durchbruch verhelfen und Batteriezellpreise auf 50–100 US\$/kWh fallen. Mit dieser Entwicklung wäre frühestens nach 2020–2025, möglicherweise aber ab 2030 zu rechnen.

Jenseits der LIB zeichnen sich nur für Anwendung 3 potenzielle solcher „Game changer“ ab: Adiabatische Druckluftspeicher (bis 2020) und RFB (jenseits 2020).

WELCHE ROLLE SPIELEN ENERGISPEICHER HEUTE IM NETZ?

Derzeit sind weltweit rund 145 GW netzgebundene Energiespeicher verbaut (Stand: Januar 2015).¹⁹ Davon ist etwa ein Drittel in Europa installiert, darunter vor allem in Spanien, Italien, Deutschland, Frankreich, England, Österreich. Etwa 95 Prozent oder mehr sind jedoch in der Regel Pumpspeicher, weltweit sind dies sogar je nach Region 98 Prozent und mehr. Der Ausbau der Speicherkapazität (Neuinstallationen) ist in den letzten Jahren mit durchschnittlich etwa 2,7 Prozent Wachstum gestiegen. Dabei ist der Anteil der Energiespeicher jenseits der Pumpspeicher von unter 1 Prozent in 2005 auf über 1,5 Prozent in 2010 und 2,5 Prozent in 2015 gewachsen. Dies bedeutet ein Wachstum von mehr als 10 Prozent.²⁰

Thermische, Schwungrad, Druckluftspeicher und unterschiedliche Arten von Batterien machen das Technologieportfolio dieser Energiespeicher aus. In Deutschland ist dabei ein relativer Fokus

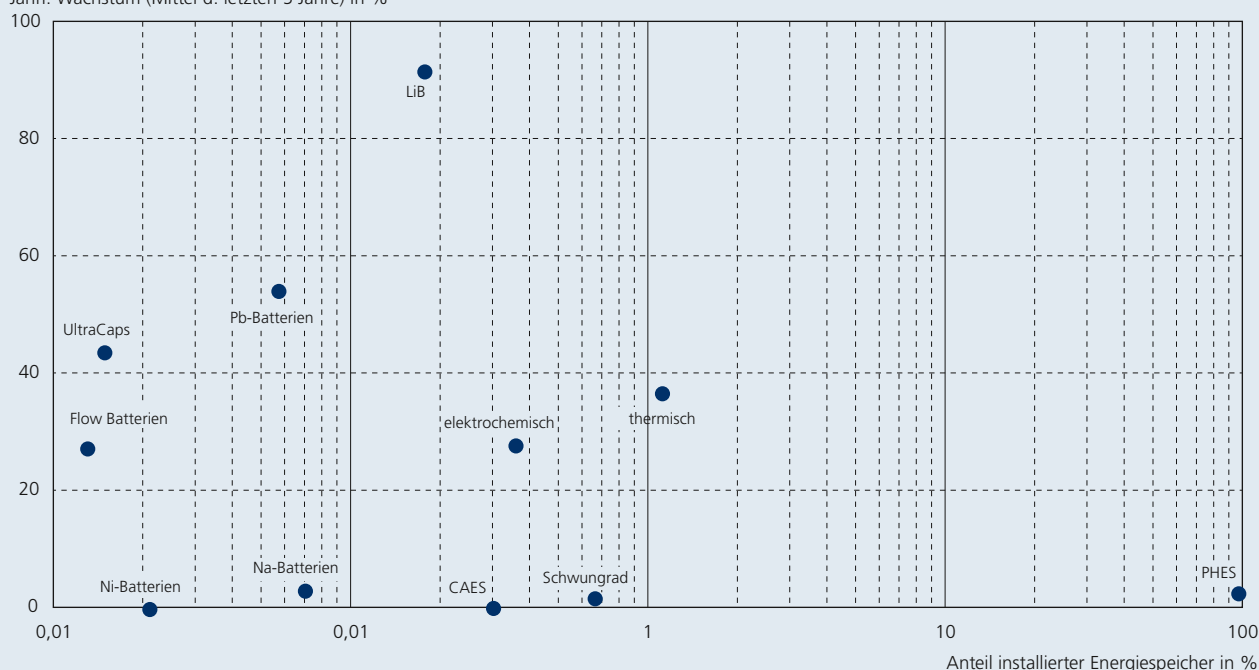
insbesondere auf Druckluftspeicher und Schwungrad Energiespeicher zu sehen, wobei (wenn auch auf verschwindend kleinem Niveau) auch Wasserstoff, Redox-Flow-Batterien und LIB installiert sind.

Das mittlere Wachstum des Zubaus netzgebundener Energiespeicher zeigt, dass weltweit besonders LIB sehr hohe Wachstumsraten aufweisen und somit der Beginn eines Marktes für LIB als netzgebundene Energiespeicher (damit nicht nur im Bereich <10 kWh sondern auch großer Speicher) zu beobachten ist.

In Europa insgesamt (vermutlich künftig auch in Deutschland) gewinnen neben elektrochemischen auch thermische Energiespeicher an Bedeutung. Heute sind dies z.B. Salzschnmelzen in Solarkraftanlagen in Spanien (engl. „concentrated solar power“, Abkürzung CSP).

Anteil und Zubau netzgebundener Energiespeicher weltweit bis 2015 (gesamt 145 GW, 01/2015)

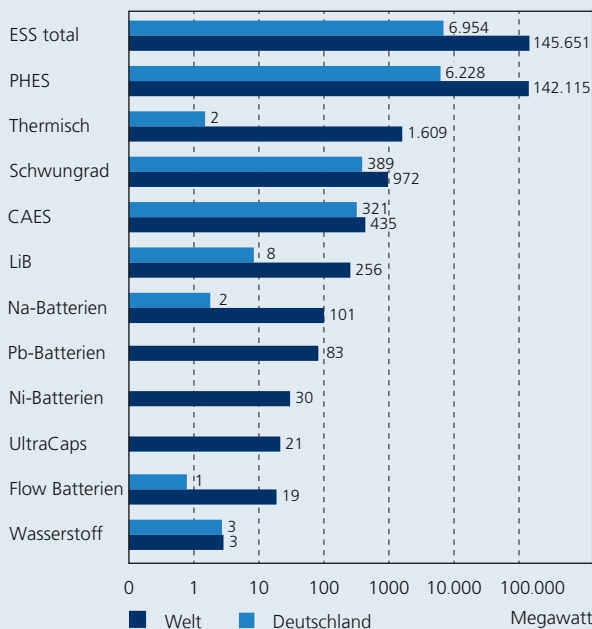
Jährl. Wachstum (Mittel d. letzten 5 Jahre) in %



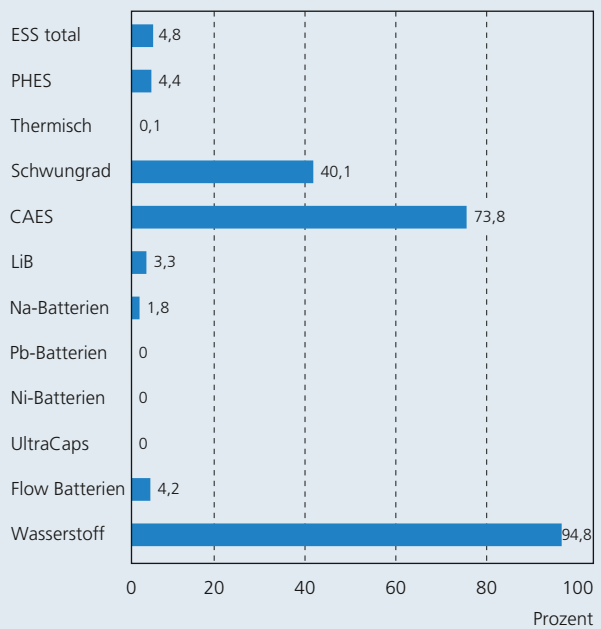
Der Grund für die besonders hohen Wachstumsraten der LIB und dies auf (jenseits der Pumpspeicher) vergleichbar hohem Niveau ist sicherlich in den großen Kostenreduktionen (ggf. auch Überkapazitäten von großformatigen Speichern durch die nur zögerlich anlaufenden Verkäufe von Elektrofahrzeugen) begründet. Nur für Pb, Supercaps und RFB zeigen sich ebenfalls hohe Wachstumsraten. Damit zeigt sich eine wachsende Nachfrage nach Energiespeichern, welche gerade im kWh bis >MWh (nicht aber zentrale Großspeicher) Einsatz finden und zwar für die Integration (fluktuierender) Erneuerbarer Energien, Netzdienstleistungen etc.

Jedoch spielen gerade Batterien als stationäre Energiespeicher nicht nur unter Netzanbindung eine große Rolle. Dezentrale kleinere bis mittelgroße Speicher können auch als Insellösungen (Off-Grid) unter dem Aspekt der Autarkie oder für die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV), wo z. B. heute die Pb breiten Einsatz findet und weitere stationäre Anwendungen eine große und zunehmend wichtige Rolle spielen. Daher sind die hier gezeigten Daten der „Global Energy Storage Database“ des US-amerikanischen Department of Energy (DOE) als eine untere Grenze des tatsächlichen Marktes für stationäre Energiespeicher aufzufassen.

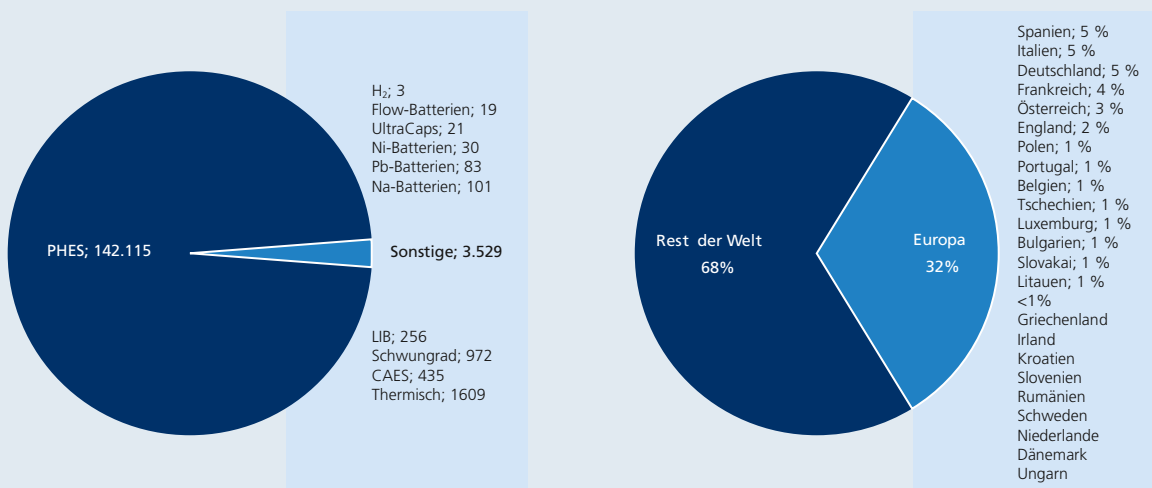
Netzgebundene Installationen bis 2015 (in MW)



Weltanteil Deutschlands je Technologie (in Prozent)



Verteilung der bis 2015 (145 GW) installierten netzgebundenen Energiespeicher



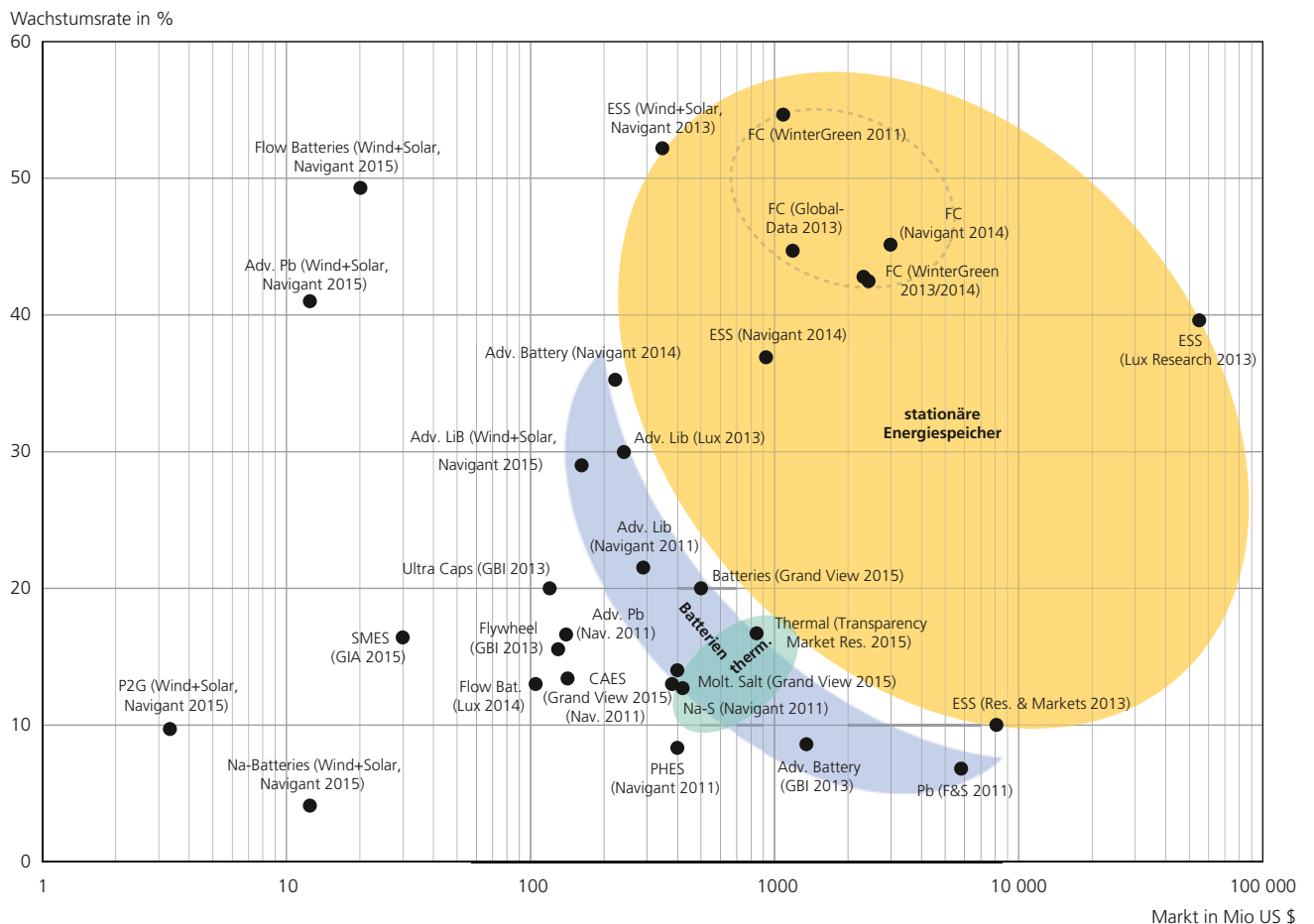
WELCHE MÄRKTE ERGEBEN SICH KÜNFTIG FÜR STATIONÄRE ENERGIESPEICHER?

Eine Auswertung bislang zu stationären Energiespeichern verfügbarer Marktstudien²¹ bestätigt zunächst das Bild, dass die genannten elektrochemischen Energiespeicher (RFB und Pb, jedoch besonders LIB auf vergleichbar hohem Niveau) aber auch thermische Speicher ein hohes Wachstumspotenzial aufweisen. Jedoch zeigen sich für diesen noch sehr jungen Markt zum Teil sehr große Unterschiede in der Einschätzung bzw. Bewertung der Marktgröße. Dies wird zudem dadurch erschwert, dass hier kleinere Speicher (zu welchen sich Angaben über Kosten z. B. in €/kWh oder €/kW finden lassen) neben Großspeichern oder

Lösungen stehen, bei welchen grundsätzlich andere Investitionen (z. B. Gelände, Bau etc.) anfallen. Ein Vergleich kann im Zweifel schwer fallen.

Dennoch lassen sich Batteriesysteme, welche typischerweise als Stunden-Speicher eingesetzt werden und im Bereich von 100–1000 \$/kWh liegen können (je nach Betrachtung der Zell-, Modulpreise oder gesamten Systemlösung) mit den Angaben zuvor über die netzgebundenen Installationen vergleichen (bzw. umrechnen).

Märkte für stationäre Energiespeicher (global, 2015)²¹



Für LIB lässt sich somit z. B. ein Markt zwischen 1–5 GWh (zwischen 2015 und 2020 sowie Annahme von 300–200\$/kWh Kosten) abschätzen (vgl. z. B. LIB-Märkte in der „Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen Batterien 2030“).

Für (optimierte) Pb zeigt sich, dass neben „netzgebundenen“ Speichern für die Integration Erneuerbarer Energien (Wind- und Solarenergie) bereits ein weitaus größerer stationärer Markt vorliegt. Pb werden neben dem Einsatz in Starterbatterien, Gabelstaplern etc. in elektromobilen Anwendungen auch für Telekom/Mobilfunk, USV (zusammen rund 80 Prozent am stationären Markt) sowie Standby, Kontroll- und weitere Anwendungen im Umfeld stationärer Anwendungen verwendet. Der stationäre Markt liegt heute (um 2015) bei rund 6–7 Mrd \$^{22, 23} und nur etwa 5 Prozent hiervon sind netzintegrierte Energiespeicher, mit Bezug auf die Integration Erneuerbarer Energien ist es wiederum nur ein Bruchteil (siehe Abbildung S. 28).

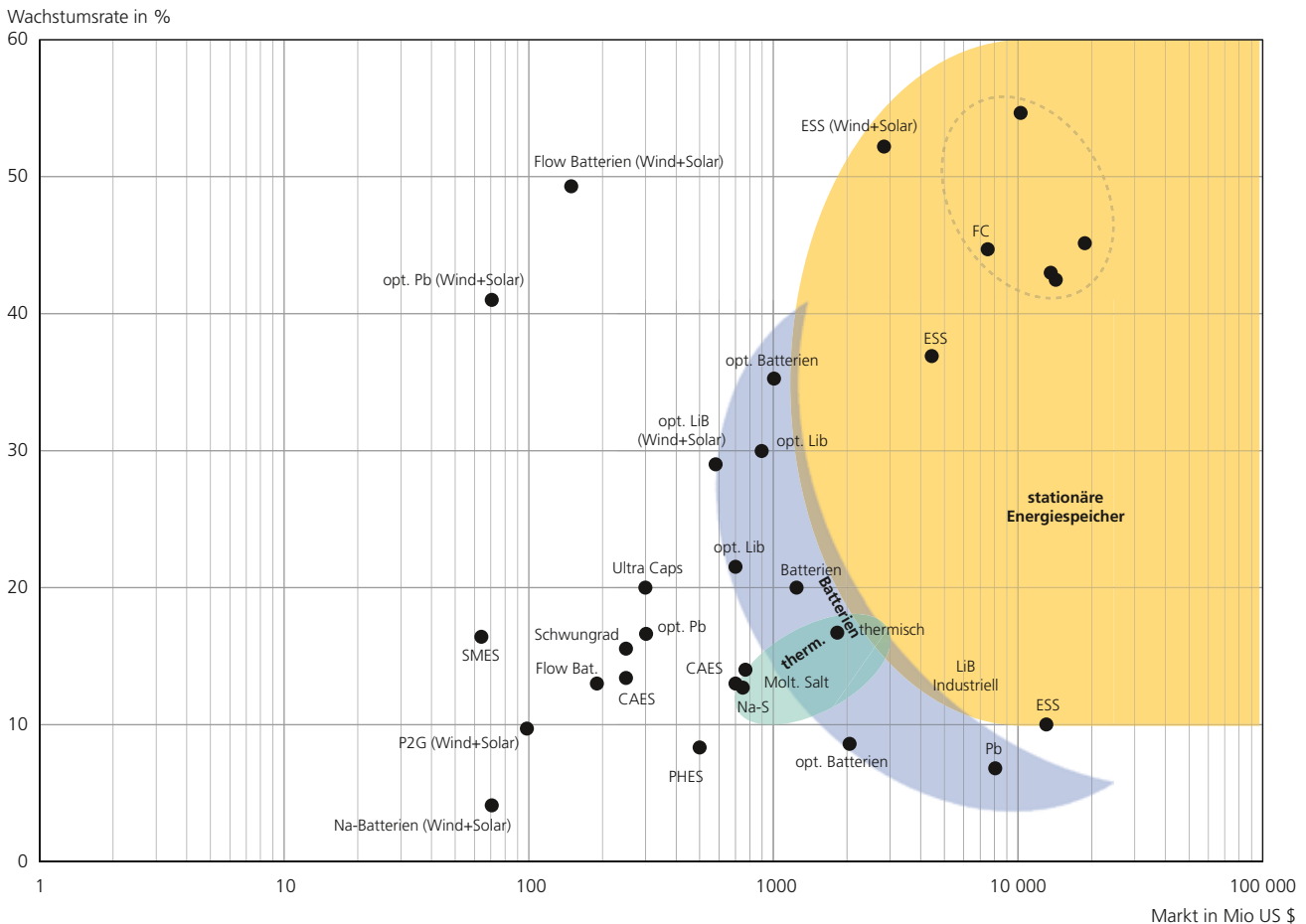
Die Abbildungen zeigen für 2015 und 2020 die aus diversen Marktstudien eingeschätzten Märkte in Mio US\$ und auf einer logarithmischen Skala vs. dem zwischen 2015 und 2020 erwarteten durchschnittlichen Wachstum in Prozent. Für etablierte Tech-

nologien pendeln sich Wachstumsraten i. d. R. auf Niveaus unterhalb 10 Prozent ein (siehe z. B. den zuvor genannten etablierten Pb-Batterie-Gesamtmarkt für stationäre Speicher). Neben den diversen Energiespeichern ist zum Vergleich auch der erwartete Markt für stationäre Brennstoffzellensysteme (alle Brennstoffzellentypen) in Anwendungen wie Primärenergie, der Kraft-Wärme-Kopplung (mikro-BHKs, BHKs) etc. angegeben.

Somit ergeben sich mit Bezug auf die in der Roadmap diskutierten Anwendungsfälle A1 bis A4 nicht nur für netzgebundene Speicher Zukunftsmärkte, sondern gerade für Batterien auch diverse bereits existierende Märkte (z. B. Pb-Anwendungen), welche durch LIB künftig potenziell substituiert werden können sowie neue Märkte (z. B. Off-Grid, Insellösungen).

Jenseits 2020 könnten elektrochemische sowie thermische Speicher dabei bereits deutliche Anteile des insgesamt zu erschließenden Marktes für stationäre Energiespeicherung gewinnen. Die Wachstumsraten dürften sich dann aber bei deutlich geringeren Werten einpendeln (siehe Abbildung unten, jedoch noch mit den Wachstumsraten aus 2015, diese dürften dann niedriger einzustufen sein).

Märkte für stationäre Energiespeicher (global, 2020)²¹



FAZIT UND AUSBLICK

FAZIT

Der Markt für stationäre Energiespeicher wird mittel- bis langfristig mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien deutlich anwachsen. Dabei werden sich mit zunehmender Wirtschaftlichkeit elektrochemischer Speicherlösungen auch vielfältige Anwendungen bzw. Geschäftsmodelle erschließen lassen. Jedoch existieren bereits heute breite Anwendungen auch jenseits netzgebundener Speicheranwendungen.

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) haben das Potenzial, sowohl netzgebundene als auch Off-Grid-Anwendungen zu erschließen. Dabei sind je nach Anwendung in der Regel existierende Energiespeicherlösungen oder andere Flexibilisierungsoptionen vorhanden und nicht überall könnte sich der Einsatz von LIB durchsetzen. Zwar könnten stark reduzierte Kosten künftig optimierter großformatiger LIB-Zellen aus der Elektromobilität einen „Game changer“ darstellen, dabei existieren je nach Anwendungsfall aber weitere spezifische Anforderungen.

Es ist daher zu erwarten, dass es auch künftig nicht die eine Energiespeicherlösung für alle Anwendungen geben wird. Gleichzeitig ist nicht zu erwarten, dass sich das Portfolio von Energiespeichertechnologien deutlich weiter diversifiziert.

Weiterhin bergen nicht alle potenziellen Anwendungen das gleiche attraktive Marktpotenzial. Die Nachfrage nach kleinen bis großen Energiespeichersystemen kann durchaus unterschiedlich ausfallen, wie z. B. ein begrenzter Markt für die gewerbliche Eigenbedarfsoptimierung, wohl aber ein breiterer Markt für private, öffentliche dezentrale (PV-)Batteriesysteme. Für die Regelleistung dürfte in absehbarer Zeit sogar direkt eine Marktsättigung eintreten.

Damit werden Technologien, Geschäftsmodelle und Marktentwicklung für stationäre Energiespeicher weiterhin komplex und schwierig zu bewerten sein, da sie kurzfristig ggf. erst durch die Kombination bestimmter Nutzungsarten (sogenanntes „Multi-

purpose design“) wirtschaftlich attraktiv werden. Neben technischen Entwicklungen können daher künftig auch entsprechend verbesserte Bewertungsmodelle die Marktentwicklung begleiten und durch ein tieferes Verständnis zur Diffusion stationärer Energiespeicher beitragen.

AKTUALISIERUNG DER ROADMAP

Die „Gesamt-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/grm-sesroad.php.

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

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 „Markthochlaufszzenarien 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.

BHKW

Abkürzung für Blockheizkraftwerk, siehe KWK.

Blindleistungskompensation

Auf Übertragungsnetzebene wird neben elektrischer Wirkenergie auch Blindenergie pro Zeiteinheit von Erzeugern zu Verbrauchern übertragen: Während die am Netz angeschlossenen elektrischen Verbraucher die Wirkenergie umsetzen, wird die Blindenergie nicht verbraucht.²⁴ Die Blindleistung verrichtet keine nutzbare Arbeit auf der Seite der Verbraucher, sie dient nur der Erzeugung von elektromagnetischen Feldern z. B. für den Betrieb von Elektromotoren. Blindleistung ergibt sich, wenn Leistung aus dem Übertragungsnetz bezogen, dann aber zeitversetzt wieder in das Stromnetz eingespeist wird und auf diese Weise zwischen Verbraucher und Erzeuger pendelt. Durch diese zusätzliche Belastung müssen die Netze größer dimensioniert werden, um neben der zur Verfügung gestellten Wirkleistung auch noch die pendelnde Blindleistung aufzunehmen. Bei einem steigenden Anteil von Blindleistung im Netz verringert sich die Kapazität für die Wirkleistung, weniger Strom in Form von elektrischer Ladung kann transportiert werden. Blindströme belasten nicht nur Übertragungsnetze, sondern auch Transformatoren und führen in Leitungen zu Übertragungsverlusten. Daher wird Blindleistung auch als Ballast in Wechselstromnetzen bezeichnet. Und da sich Wechselstrom sehr gut zum Ferntransport von elektrischer Energie eignet, tritt das technische Phänomen Blindleistung auch in öffentlichen Netzen auf. Wird jedoch eine Blindleistungskompensationsanlage, welche die Blindleistung erzeugt und wieder aufnimmt, verbrauchernah installiert, kann das Stromnetz entlastet und daher kleiner dimensioniert werden. In so entlasteten Stromnetzen entspricht die gesamte Leistung eines Übertragungsnetzes der tatsächlichen Wirkleistung, mehr Kapazität steht zum Stromtransport zur Verfügung. Großformatige stationäre Energiespeicher werden in der Zukunft zum Blindleistungshaushalt positiv beitragen können.

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 und Wasserstoff-Tank. In dieser Aufstellung ist das System mit 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.

Direktvermarktung

Die Direktvermarktung Erneuerbarer Energien ist Teil des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und wird dort in Abschnitt 2 bzw. den Paragraphen 34 bis 36 abgehandelt. Der Betreiber einer regenerativen Stromerzeugungsanlage kann seine elektrische Energie insofern direkt vermarkten, als dass er sie nicht an das zuständige regionale Energieversorgungsunternehmen bzw. den Stromnetzbetreiber überstellt und dafür eine umlagefinanzierte Vergütung kassiert, sondern durch ein öffentliches Stromnetz leitet und direkt an einen interessierten Abnehmer verkauft. Für diese Direktvermarktung kann der Anlagenbetreiber eine sogenannte Marktprämie vom Stromnetzbetreiber verlangen, ein Anreiz, Stromerzeugungsanlagen markt- bzw. nachfrageorientiert zu betreiben: Während die Marktprämie mit der aktuellen Stromnachfrage bzw. dem aktuellen Strompreis variiert, bleibt die oben genannte Vergütung immer konstant.

DOE

Engl. „(United States) Department of Energy“, das Energieministerium der Vereinigten Staaten von Amerika. Im November 2015 geleitet von Minister Dr. Ernest Moniz.

Druckluftspeicher

Siehe Adiabatische Druckluftspeicher.

Druckluftspeicher

Siehe Adiabatische Druckluftspeicher.

EE

Abkürzung für Erneuerbare Energien.

EEG

Das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (auch Erneuerbare-Energien-Gesetz genannt, Abkürzung EEG) trat zum 1. April 2000 in Kraft und soll die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und Kernkraft in der Stromerzeugung reduzieren und damit dem Klimaschutz dienen.

EFH

Abkürzung für Einfamilienhaus.

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 vor allem 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 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.

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.

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.

HT

Abkürzung z. B. im Zusammenhang der „Hochtemperatur“-Batterien.

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).

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 relativ gering bzw. die Leistungsdichte relativ hoch ist, eignen sich Kondensatoren nicht als ausschließlicher Energiespeicher für die Elektromobilität, sondern viel eher für die stationäre Energiespeicherung.

kW

Abkürzung für Kilowatt.

kWh

Abkürzung für Kilowattstunde.

KWK

Abkürzung für Kraft-Wärme-Kopplung bzw. die gleichzeitige Umwandlung von eingesetzter Energie in elektrische Energie und in Nutzwärme in einer ortsfesten technischen Anlage nach dem Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG 2002).²⁵ Durch die Kopplung kann die eingesetzte Primärenergie effizienter genutzt und somit auch CO₂-Emissionen gesenkt werden. Insgesamt liefert eine KWK-Anlage einen höheren Wirkungsgrad als bei getrennter Strom- und Wärmeerzeugung.

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-Caps

Engl. „lithium ion capacitor“ (LIC). Bei Lithium-Ionen-Kondensatoren (Hybridsuperkondensatoren) handelt es sich um eine Untergruppe der Superkondensatoren: Während die positive Elektrode der eines Doppelschichtkondensators entspricht, ist die negative Elektrode Batterie-ähnlich mit Lithium dotiert. Dadurch werden Lithium-Ionen-Kondensatoren aufgrund ihrer erhöhten Energiedichte besonders attraktiv, gepaart mit einer hohen Leistungsdichte und kalendarischen und zyklischen Lebensdauer.

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-Legierung/C-Komposit

Lithium kann mit anderen Metallen legiert werden, wodurch sich die Elektrodeneigenschaften im Vergleich zu graphitbasierten Elektroden bzgl. der Kapazität deutlich verbessern. Die dabei auftretenden Volumenänderungen sind schwer beherrschbar, aber der Mittelweg der Kohlenstoff-Legierungs-Komposite als neue Anodenmaterialien ermöglicht deutliche Verbesserungen der Batterieelektroden, da sich schon geringe nanostrukturierte Anteile der Legierung deutlich positiv auswirken.

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 vor allem wann Lithium-Luft-Batterien als wieder-aufladbare Systeme für den Einsatz in der stationären Energiespeicherung realisiert werden können.

LiMnPO₄

Die Summenformel für Lithium-Mangan-Phosphat, eine chemische Verbindung und ein Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien, mit ähnlichen Eigenschaften wie Lithium-Manganoxid.

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 besitzen eine Anode aus Lithium und eine Kathode aus Schwefel sowie Kohlenstoff, was eine sehr hohe Energiedichte ermöglicht.

LMO

Engl. „lithium manganese oxide“, Lithium-Manganoxid (Summenformel LiMn_2O_4) ist ein Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien. Vorteile existieren hinsichtlich der Kosten sowie der höheren Sicherheit. Nachteile bestehen bei der Lebensdauer.

Lokalebene

Herkömmliche Stromnetze können in drei Ebenen eingeteilt werden: Lokal-, Verteilnetz- und Übertragungsnetzebene. Die lokale Ebene stellt die endverbrauchernächste Ebene dar und diese Netze gehören im Normalfall den großen Energieversorgungsunternehmen bzw. Stromanbietern, manchmal auch den Kommunen selbst.

LTO

Engl. „lithium titanium oxide“, Abkürzung von Lithium-Titanoxid oder Lithium-Titanat mit der Summenformel $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, 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 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.

Must-Run

Für einen ungefährdeten Betrieb des Verbundnetzes muss europaweit zu jedem Zeitpunkt eine Äquivalenz zwischen Erzeugung und Verbrauch gelten.²⁶ Für die Einhaltung der Äquivalenz ist zu beachten, dass der Prognosen unterlegene, volatile Verbrauch der Lasten eine vorgegebene Regelgröße darstellt, nach der sich die Erzeugung zwingend richten muss. Dies setzt eine Flexibilität auf der Erzeugerseite voraus. Diese kann nur zum Teil gewährleistet werden, denn eine gewisse Starrheit im Kraftwerkspark ist immer vorhanden. In diesem Zusammenhang hat sich der Begriff „Must-Run-Kapazitäten“ bzw. synonym auch Mindeststromerzeugung etabliert. Als solche gelten die vom Netzbetreiber ausgewählten, meist konventionelle Kraftwerke, welche im Betrieb bleiben müssen, um einen sicheren Netzbetrieb durch Bereitstellung von Systemdienstleistungen wie Regelenergien und Blindleistungsbereitstellung zu gewährleisten. Zusätzlich gelten nach Vorgaben des Gesetzgebers auch die fluktuierende, dargebotsabhängige Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen sowie die wärmegeführten, d. h. vom Wärmebedarf abhängende Kraftwärmekopplungsanlagen als „Must-Run-Kapazitäten“.

MW

Abkürzung für Megawatt.

MWh

Abkürzung für Megawattstunde.

Na-basierte Niedrig-Temperatur-Systeme

Natrium-Schwefel-Akkumulatoren werden aktuell noch mit einer hohen Betriebstemperatur eingesetzt. Um das aufwändige und damit kostenintensive Temperaturmanagement dieser Batterietechnologie einzusparen, sollen Na-basierte Niedrig-Temperatur-Systeme auch unter normalen Standardbedingungen funktionieren.

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 eben den genannten Elementen zum Einsatz kommen und als fester Elektrolyt eine Natriumionen leitende Keramik verwendet wird.

NCA

Engl. „nickel cobalt aluminium (oxide)“, Abkürzung für Nickel-Kobaltaluminium(-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

Synonym auch Systemdienstleistungen.

Netznutzungsentgelte

Netzentgelte sind von den Netznutzern für die Inanspruchnahme des Stromnetzes bzw. zur Durchleitung von Strom zu entrichten.²⁷ Netzentgeltspflichtig sind allerdings nur die Entnahmen, für die Einspeisung von Strom in das Netz müssen, anders als teilweise im Gasbereich, keine Netzentgelte entrichtet werden. Mit den Netznutzungsentgelten begleichen die Netzbetreiber die Kosten für Errichtung, Ausbau und Instandhaltung sowie Betrieb des Stromnetzsystems. Privatkunden sowie kleineren Unternehmen werden die Netznutzungsentgelte von den Strom- bzw. Gaslieferanten über die Strom- bzw. Gasrechnung in Rechnung gestellt, Großverbraucher z. B. in der Industrie bezahlen sie direkt.²⁸ Weil Kleinverbraucher mit Niederspannungsanschlüssen die vollen Netznutzungsentgelte für alle Netzebenen bezahlen müssen, liegen ihre Kosten höher als für größere Verbraucher, die am Mittelspannungsnetz oder auf höheren Spannungsebenen angeschlossen sind und nur für diese und alle höheren Ebenen bezahlen, da die Kosten der Verteilungsnetze (vor allem der auf der Niederspannungsebene) am höchsten sind.

Netzstabilität

Der Begriff der Netzstabilität beschreibt die Anforderung einer stabilen Netzfrequenz an das Stromnetz als dynamischem System. Diese wird durch die lokalen Netzbetreiber gewährleistet und beträgt in Europa 50 Hertz. Probleme mit ihrer Aufrechterhaltung entstehen insbesondere bei Frequenz-, Spannungs- und Lastfluss-

abweichungen.²⁹ Um entsprechende Spannungs- und Frequenzschwankungen auszugleichen und damit die regionale Netzstabilität zu erhalten, ist eine systemweite Koordination der Lastflüsse (Stromeinspeisung und -entnahme) notwendig. – Gerade durch den zunehmenden Ausbau der fluktuierenden Erneuerbaren Energien entstehen hier neue Herausforderungen hinsichtlich der Netzstabilität. Durch den Einsatz großformatiger stationärer Energiespeicher kann eine stabile Netzfrequenz leichter aufrecht erhalten werden.

NiCd

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

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 Entladenspannung und können relativ schnell geladen werden.

Notstromversorgung

Bei der Notstromversorgung wird grundsätzlich zwischen der sogenannten Unterbrechungsfreien Stromversorgung und Netzersatzanlagen (NEA) unterschieden.³⁰ 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. 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 Energieinspeisung (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. Sie sind nicht an ein ggf. landesweites, öffentliches Stromnetz angeschlossen bzw. werden vor allem 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.

P2G

Engl. „power to gas“ bezeichnet einen Prozess, bei dem über eine Elektrolyse oder reversible Brennstoffzellen elektrische Energie aus den Erneuerbaren Energien in chemische Energie umgewandelt und Gas gewonnen wird, teilweise Methan über eine der Elektrolyse folgende Methanisierung oder reiner Sauerstoff und Wasserstoff, der z. B. in geologischen Kavernen zwischengespeichert werden kann. P2G ist ein Teil der Power-to-X-Technologiefamilie, die mit dem zunehmenden Einsatz fluktuierender Erneuerbarer Energien und temporär anfallenden Stromüberschüssen eine große Aufwertung erfährt (siehe Power-to-X).

Pb

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

Peak Shaving

Durch den Einsatz von großen Energiespeichersystemen sollen die Spitzen der Lastnachfrage aus Erzeugungsperspektive 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 vor allem 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.³¹

PEM-FC

Engl. „proton exchange membrane fuel cell“ (siehe BZ).

PHES

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

Power-to-X

Die Idee hinter der Power-to-X-Technologiefamilie ist die, dass mit dem zunehmenden Einsatz fluktuierender Erneuerbarer Energien temporär anfallende Stromüberschüsse in Prozessen eingesetzt werden, um einen ansonsten eher energieintensiven und deshalb ggf. eher nicht umgesetzten Verwendungszweck „X“ zu realisieren. Besonders diskutiert wird in diesem Zusammenhang „power to gas“ (siehe P2G). Der große Vorteil von Power-to-X ist die Vermeidung von CO₂-Emissionen durch den Einsatz „grünen“ Stroms für ansonsten durch den Einsatz fossiler Brennstoffe eher emissionsreiche Prozesse.

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.

Pt

Platin ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Pt. Es hat katalytische Eigenschaften und wird deshalb vor allem als Katalysator in Brennstoffzellen eingesetzt, wo es die chemischen Reaktionen beschleunigt, ohne dabei selbst verbraucht zu werden. Weil Platin allerdings sehr teuer ist und als Katalysator schnell altert, wird in Forschung und Entwicklung an entsprechenden Substituten gearbeitet.

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 Regelenergie (siehe Regelleistung) herstellen und besitzen die Fähigkeit zum 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.³² 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 Stromnetznachfrage auszugleichen 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 Übertragungs-

netzbetreibern 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 Erbringung und wird mindestens 15 Minuten lang in konstanter Höhe abgerufen.

Reserveleistung

Bei einer unvorhergesehenen Störung des Stromnetzes setzt das Energieversorgungsunternehmen Reserveleistung ein, um Stromausfällen entgegenzuwirken. Eine Reserveleistung kann auch vom Endverbraucher bei Stromausfällen eingesetzt werden, insofern dieser eine eigene Stromerzeugungsquelle besitzt.

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.

Rotierende Massen

Als rotierende Massen bezeichnet man riesige Generatoren und Turbinen in Großkraftwerken mit tausenden Umdrehungen pro Minute, mit welchen das konventionelle Stromnetz geregelt wird.³³ Auf der Turbinenwelle sitzt ein Synchrongenerator, in dessen rotierenden Spulen der elektrische Strom entsteht, mit der Netzfrequenz von 50 Hertz. Jede rotierende Masse, die so direkt ans Netz angeschlossen ist, wirkt mit ihrer Trägheit, nicht nur in den Großkraftwerken: Sie glättet Frequenzsprünge. Das gilt für alle Synchronmaschinen, denn sie folgen in ihrer Frequenz bzw. Drehzahl genau dem Netz. Wenn die Frequenz absinkt, schieben die bereits laufenden Generatoren automatisch zusätzliche Energie ins Netz, um die sinkende Frequenz zu stabilisieren. Erst nach mehr als 20 Millisekunden – so viel Zeit braucht die Leitwarte der Netzbetreiber, um zu reagieren – wird die sogenannte Primärregelreserve aktiviert.

Damit die rotierenden Massen die Frequenzsprünge im Netz in den ersten Millisekunden glätten können, müssen die Großkraftwerke laufen. Kohlekraftwerke oder Gasturbinen kann man in ihrer Leistung nicht beliebig weit abregeln, weil der Verbrennungsprozess in Gang und die Turbinen und Generatoren auf Netzfrequenz gehalten werden müssen. Sie laufen also immer mit 40 bis 50 Prozent ihrer Nennleistung „in Bereitschaft“, auch wenn kein Regelungsbedarf besteht. In den kommenden Jahren soll diese Funktion allerdings zunehmend auch von großen Solarparks durch die Bereitstellung künstlicher Schwungmassen unter Zuhilfenahme von großformatigen stationären Energiespeichern erfüllt werden.

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.

SOFC

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

Stack

Die in einer einzelnen Brennstoffzelle 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-Stack, den so genannten Stack.

Supercaps

Sogenannte Superkondensatoren sind elektrochemische Kondensatoren, 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.³⁴ In Zeiten von hoher Stromnachfrage und/oder -preisen könnte das Gas wieder in elektrische Energie bzw. Strom umgewandelt werden.

Systemdienstleistungen

Unter Systemdienstleistungen bzw. synonym auch Netzdienstleistungen 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.³⁵ 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.

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.

Thermal runaway

Eine Schwäche von Lithium-Ionen-Batterien ist, dass sie über keine inhärente Sicherheit verfügen und thermisch „durchgehen“ bzw. einen „thermal runaway“ erleiden können. Unterschieden werden externe Auslöser wie elektrischer, thermischer und mechanischer Fehlgebrauch (engl. „abuse“) und interne Auslöser

wie metallische Verunreinigungen, schadhafte Separatoren und Lithium-Abscheidungen auf der Anode, die allesamt zur Zersetzung der Zelle führen können.³⁶ Das Ergebnis ist überwiegend ein Anstieg der Zelltemperatur, der zur thermischen Zersetzung weiterer Zellkomponenten und zu zusätzlicher Wärmeentwicklung führen kann. Die Folge dieses sich selbst beschleunigenden Vorgangs ist also häufig eine unkontrollierte Zellerhitzung bis hin zum Zellbrand. Die chemische Sicherheit der Lithium-Ionen-Batterien basiert deshalb in erster Linie auf der thermischen Stabilität der Zellkomponenten und dem Gefährdungspotenzial der Zersetzungsprodukte.

Transmission codes

In Deutschland erfolgt die Nutzung der elektrischen Stromnetze nach dem System des regulierten Netzzugangs.³⁷ Unter den Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) sind die Regeln zusammengefasst, die die wirtschaftliche und verfahrenstechnische Grundlage der Netznutzung bilden und der technisch-betrieblichen Koordination zwischen den systemverantwortlichen ÜNB und den Netznutzern dienen.

Übertragungsnetz (ÜN)

Übertragungsnetze ermöglichen einen deutschlandweiten und grenzüberschreitenden Transport von Strom über große Entfernungen – möglichst verlustarm und direkt dorthin, wo viel Strom verbraucht wird.³⁸ Über sogenannte Kuppelleitungen ist das deutsche Höchstspannungsnetz an das europäische Verbundnetz angeschlossen. Übertragen wird bei Drehstrom mit Höchstspannung von 220 Kilovolt (kV) oder 380 kV, bei den geplanten neuen Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen mit bis zu 525 kV. Die Betreiber dieser Übertragungsnetze sind Dienstleistungsunternehmen, welche die Infrastruktur der überregionalen Stromnetze zur elektrischen Energieübertragung operativ betreiben, für die Instandhaltung des Netzes sorgen, Stromleitungen ausbauen und modernisieren und Stromhändlern/-lieferanten diskriminierungsfrei Zugang zu diesen Netzen gewähren. Darüber hinaus haben sie die Aufgabe, Netzschwankungen, welche sich durch Abweichungen zwischen aktuell erzeugter Strommenge und Stromnachfrage ergeben, möglichst gering zu halten. In Deutschland ist das Höchstspannungsübertragungsnetz im Wesentlichen Eigentum der vier Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) TenneT, 50Hertz Transmission, Amprion und TransnetBW. Im herkömmlichen Stromnetz dienen Übertragungsnetze der elektrischen Energieübertragung von großen Erzeugungsanlagen wie z. B. Kernkraftwerken hin zu Verbrauchsschwerpunkten, wo die elektrische Energie über Umspannwerke auf das sogenannte Verteilnetz übertragen wurde.

USV

Abkürzung für Unterbrechungsfreie Stromversorgung. USV beziehen ihre Energie aus Akkumulatoren und werden zum Schutz hochsensibler technischer Systeme wie Großrechner, Server und Telefonanlagen eingesetzt.³⁹ 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.

V

Abkürzung für Volt.

V2G

Abkürzung für engl. „vehicle to grid“ bzw. „Fahrzeug ans Netz“, ein Konzept, in dessen Rahmen die großformatigen Batterien von Elektrofahrzeugen in Zukunft als Energiespeicher verwendet werden sollen. In Zeiten von niedriger Stromnachfrage und/oder -preisen (z. B. vor- oder nachmittags) könnte zu viel produzierter Strom in Elektrofahrzeugen zwischengespeichert werden, um ihn in Zeiten von hoher Stromnachfrage und/oder -preisen (z. B. mittags) wieder in das Stromnetz einzuspeisen. Als Teil des Smart Grid könnten Elektrofahrzeuge so bzw. vor allem in Standzeiten als eine Art riesiger Energiespeicher dienen. Einen großen Haken stellt in diesem Fall aber die Kompensation für die Energiespeicher-Besitzer dar, die für zusätzliche Ladezyklen bzw. Batteriealterung entschädigt werden sollten. Das gesamte Konzept macht allerdings überhaupt erst dann Sinn, wenn es eine kritische Masse an Elektrofahrzeugen in Deutschland gibt.

Verteilnetz (VN)

Aus dem Übertragungsnetz wird die elektrische Energie über Umspannwerke in Verteilnetze mit Hoch-, Mittel- und Niederspannung übertragen.⁴⁰ Das Hochspannungsnetz dient der Grobverteilung von Strom: Der Strom wird aus dem Höchstspannungsnetz zu Umspannwerken von Ballungszentren oder großen Industriebetrieben geleitet. Das Mittelspannungsnetz verteilt den Strom an regionale Transformatorstationen oder direkt an größere Einrichtungen wie beispielsweise Krankenhäuser oder Fabriken. Das Niederspannungsnetz dient der Feinverteilung. An das Niederspannungsnetz sind private Haushalte, kleinere Industriebetriebe, Gewerbe und Verwaltung angeschlossen. Die Netze mit niedrigeren Spannungsebenen dienen der Verteilung des Stroms an die Endverbraucher. In diesem Bereich ist eine Vielzahl von regionalen und kommunalen Netzbetreibern tätig.

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. 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.

xEV

Ein als Sammelbegriff bzw. -kürzel für alle (batterie-)elektrisch angetriebenen Fahrzeugkonzepte (Elektrofahrzeuge, engl. „electric vehicle“ bzw. EV) gebrauchter 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

Zn/Br-RFB

Die Zink-Brom-RFB ist der Hauptvertreter der Spezialform Hybrid-Flow-Batterien.⁴¹ Diese unterscheiden sich von den konventionellen 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 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 vor allem für den Konsumer-Bereich bzw. für Hörgeräte relevant waren.

Zyklusfestigkeit

Die Aufladung und Entladung einer Batterie wird als ein Zyklus definiert. Je zyklusfester 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 Zyklusfestigkeit 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 Zyklusfestigkeit.

QUELLEN

¹ Agora Energiewende (2015): Was wäre, wenn... ein flächendeckender Rollout von Solar-Speicher-Systemen stattfände? (Hintergrundpapier, Oktober 2015). Online-Ressource, Link: http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2015/PV-Speicher-Rollout/Agora_Speicherdurchbruch_2015-10-27.pdf, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

² Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BJV, 2015): Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzentgelt-verordnung – StromNEV) § 19 Sonderformen der Netznutzung. Online-Ressource, Link: http://www.gesetze-im-internet.de/stromnev/___19.html, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

³ Die RFB kann heute für 600–700 €/kWh gekauft werden (2000–3000 €/kW, Energie-/Leistungsverhältnis bei 3–5 MWh/MW, wegen i.d.R. Pilotprojekten fällt eine konkretere Abschätzung und Einbezug der Systemgrenze schwer). Dies im Vergleich zu etwa 700–1400 €/kWh einer LIB (1000–2000 €/kW, Energie-/Leistungsverhältnis bei vermutlich etwa 1,4 MWh/MW für LIB, Gesamtsystem und Endkundenpreis; z. B. kosten STEAG-Systeme schlüsselfertig 1100 €/kW) Die Preise für LIB entwickeln sich dabei aber weiterhin sehr dynamisch und könnten aktuell bereits noch niedriger liegen.

⁴ Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (2014): Energie – Neue Redox-Flow-Batterie überzeugt. Online-Ressource, Link: <http://www.springerprofessional.de/neue-redox-flow-batterie-ueberzeugt/5276646.html>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

⁵ pv magazine group GmbH & Co. KG/pv magazine, Photovoltaic Markets & Technology (2014): Storage & Smart Grids – Market overview storage systems. Online-Ressource, Link: http://www.pv-magazine.com/fileadmin/PDFs/Storage_Database.pdf, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

⁶ Energie & Management Verlagsgesellschaft mbH (2014): Speicher – Die Speichernetze kommen (Ausgabe 15. März 2014, Armin Müller)

⁷ Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N. e.V., 2014): Marktübersicht Batteriespeicher – Ein Informationsangebot (Stand: August 2014). Online-Ressource (Stand: September 2015), Link: http://www.carmen-ev.de/files/Sonne_Wind_und_Co/Speicher/Markt%C3%BCbersicht-Batteriespeicher_Web.pdf, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

⁸ Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG/Sonne Wind & Wärme (2014): Photovoltaik/Speichersysteme – Optimismus ist Pflicht (Ausgabe 04/2014, Ina Röpcke)

⁹ Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG/Sonne Wind & Wärme (2014): Photovoltaik/Speichersysteme – Optimismus ist Pflicht (Ausgabe 04/2014, Ina Röpcke)

¹⁰ Für die LFP/LTO-LIB liegt die Zyklenzahl deutlich über der in 20 Jahren Nutzungsdauer benötigten Zahl. Hier wurden 7500 Zyklen angenommen. Tatsächlich wären sogar nur 0,6 Zyklen pro Tag bzw. rund 200 pro Jahr und damit max. 4000 Zyklen in dem Zeitraum anzunehmen. Das zeigt, dass trotz der Vorteile des Systems die hohe zyklische Lebensdauer ggf. gar nicht benötigt wird, was die Vorteile der LFP/LTO-LIB relativiert.

¹¹ International Renewable Energy Agency (IRENA, 2014): Renewable Power Generation Costs in 2014. Online-Ressource, Link: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

¹² Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2015): Erneuerbare-Energien-Gesetz 2014. Online-Ressource, Link: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/eeg-2014.html/>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

¹³ BSW – Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar, 2013): Informationspapier des BSW-Solar, Stand: 30.08.2013 – Informationen zur Förderung von Solarstrom-Speichern. Online-Ressource, Link: http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/Speicherprogramm_Hintergrundpapier.pdf, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

¹⁴ BSW – Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar, 2015): Solarthermie – Markt-anreizprogramm Wärme. Online-Ressource, Link: <http://www.solarwirtschaft.de/map.html>, zuletzt abgerufen am 30.11.2015

¹⁵ 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 3.12.2015

¹⁶ Fraunhofer IWES/Siemens AG/Universität Hannover, IEH/CUBE Engineering GmbH (2014): Kombikraftwerk 2 – Kurzbericht. Online-Ressource, Link: http://www.kombikraftwerk.de/fileadmin/Kombikraftwerk_2/Abschlussbericht/Kurzbericht_Kombikraftwerk2_final.pdf, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

¹⁷ Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV, 2014): FAQ-Liste der AG „Hand-lungsrahmen Elektromobilität“ (Stand: 12. Februar 2014). Online-Ressource, Link: http://www.dguv.de/medien/inhalt/praevention/themen_a_z/elektromobilitaet/faq_elekro.pdf, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

¹⁸ WEKA FACHMEDIEN GmbH/elektroniknet.de (2014): Batterien und Akkus – Sicherer Transport von Li-Ionen-Batterien. Online-Ressource, Link: <http://www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/artikel/114462/>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

¹⁹ Sandia Corporation (2015): DOE Global Energy Storage Database – Office of Electricity Delivery & Energy Reliability. Online-Ressource, Link: <http://www.energystorageexchange.org/>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

²⁰ European Parliament Think Tank/Directorate-General for Internal Policies, Policy Department A – Economic and Scientific Policy (2015): Energy Storage – Which Market Designs and Regulatory Incentives are Needed? (Studie für das Industry, Research and Energy (ITRE) Committee). Online-Ressource, Link: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/563469/IPOL_STU\(2015\)563469_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/563469/IPOL_STU(2015)563469_EN.pdf), zuletzt abgerufen am 3.12.2015

²¹

• Navigant 2015

Energy Storage Association (2015): Energy Storage for Renewables Integration – A Burgeoning Market. Online-Ressource, Link: <http://energystorage.org/news/esa-news/energy-storage-renewables-integration-burgeoning-market>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

• GIA 2015

Global Industry Analysts, Inc. (2015): Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Systems – A Global Strategic Business Report. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://strategy.com/MCP-7857.asp>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

• Grand View 2015

Grand View Research, Inc. (2015): Advanced Energy Storage Systems Market Analysis By Technology (Batteries, Flywheel, Thermal, Compressed Air, Molten Salt) And Segment Forecasts To 2022. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/advanced-energy-storage-systems-market>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

• Transparency Market Res. 2015

Transparency Market Research (2015): Global Thermal Energy Storage Market to Reach US\$1.8 bn till 2020, Europe to Register Maximum Demand. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://www.transparencymarketresearch.com/pressrelease/thermal-energy-storage-market.htm>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

- Navigant 2014
 Navigant Consulting, Inc. (2014): Advanced Batteries for Utility-Scale Energy Storage – Lithium Ion, Sodium Metal Halide, Sodium Sulfur, Flow, Advanced Lead-Acid, and Other Advanced Batteries: Global Market Analysis and Forecasts. Online-Ressource, Link: <http://www.navigantresearch.com/research/advanced-batteries-for-utility-scale-energy-storage>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- Navigant 2014
 Navigant Consulting, Inc. (2014): Energy Storage for the Grid is Expected to Reach \$15.6 Billion in Annual Revenue by 2024. Online-Ressource, Link: <http://www.navigantresearch.com/newsroom/energy-storage-for-the-grid-is-expected-to-reach-15-6-billion-in-annual-revenue-by-2024>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- Navigant 2014
 Navigant Consulting, Inc. (2014): Stationary Fuel Cells Fuel Cells for Prime Power, Large CHP, Residential CHP, and UPS Applications: Global Market Analysis and Forecasts. Online-Ressource, Link: <http://www.navigantresearch.com/research/stationary-fuel-cells>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- Lux Research 2014
 pv magazine group GmbH & Co. KG/pv magazine, Photovoltaic Markets & Technology (2014): Flow batteries to create \$190 million market by 2020. Online-Ressource, Link: http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/flow-batteries-to-create-190-million-market-by-2020_100017456/#axzz3Ld6UaYTC, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- WinterGreen 2014
 WinterGreen Research, Inc. (2014): Stationary Fuel Cells: Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2014 to 2020. Online-Ressource, Link: <http://wintergreenresearch.com/reports/fuel%20cell%20stationary.html>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- Lux Research 2013
 European Business Press S.A./EE Times Europe (2013): Emerging battery technologies used in the backup and UPS markets to reach \$896m during 2020. Online-Ressource, Link: http://www.electronics-eetimes.com/en/emerging-battery-technologies-used-in-the-backup-and-ups-markets-to-reach-896m-during-2020.html?cmp_id=7&news_id=222918730, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- GlobalData 2013
 GlobalData (2013): Fuel Cells - Global Market Size, Segmentation, Competitive Landscape, Regulations and Key Country Analysis to 2020. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://store.globaldata.com/market-reports/power/fuel-cells-global-market-size-segmentation-competitive-landscape-regulations-and-key-country-analysis-to-2020>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- Navigant 2013
 Navigant Consulting, Inc. (2013): Energy Storage Systems for Solar and Wind Power Integration Will Surpass \$10 Billion in Annual Market Value by 2023. Online-Ressource, Link: <http://www.navigantresearch.com/newsroom/energy-storage-systems-for-solar-and-wind-power-integration-will-surpass-10-billion-in-annual-market-value-by-2023>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- Res. and Markets 2013
 Research and Markets (2013): Advanced Energy Storage Systems Market by Technology, Applications, & Geography – Global Trends & Forecast to 2018. Online-Ressource, Link: http://www.researchandmarkets.com/research/wht2q6/advanced_energy, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- Lux Research 2013
 Sustainable Enterprises Media, Inc. (2013): Eos To Conquer The World? Online-Ressource, Link: <http://cleantechnica.com/2013/07/19/eos-to-conquer-the-world/>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- GBI 2013
 Sustainable Enterprises Media, Inc. (2013): Global Energy Storage Market To 2020 (Charts, Sort Of...). Online-Ressource, Link: <http://cleantechnica.com/2013/06/18/global-energy-storage-market-to-2020-charts-sort-of/>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- WinterGreen 2013
 WinterGreen Research, Inc. (2013): Stationary Fuel Cells – Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2013 to 2019. Online-Ressource, Link: <http://www.wintergreenresearch.com/reports/stationary%20fuel%20cell%202013%20brochure%201.pdf>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- F&S 2011
 Frost & Sullivan (2011): Global Stationary Lead Acid (SLA) Battery Market. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://www.frost.com/prod/servlet/report-brochure.pag?id=N8CA-01-00-00-00>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- Navigant 2011
 Pike Research LLC (2011): EXECUTIVE SUMMARY – Energy Storage Systems for Ancillary Services – Frequency Regulation, Voltage Support, Short Duration Renewables Integration, Spinning Reserves, Electric Supply Reserve Capacity, and Load Following: Market Analysis and Forecasts. Online-Ressource, Link: <http://www.navigantresearch.com/wp-content/uploads/2011/10/ASVC-11-Executive-Summary.pdf>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- WinterGreen 2011
 WinterGreen Research, Inc. (2011): Stationary Fuel Cells Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2011 to 2017. Online-Ressource, Link: <http://www.wintergreenresearch.com/reports/stationary%20fuel%20cell%202011%20brochure.pdf>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- ²² Wietschel et al. (2015): Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden – Seite 191ff.

- ²³ avicenne ENERGY (2015): Lithium-Ion Battery Market Expansion Beyond Consumer and Automotive. Online-Ressource (Registrierung erforderlich), Link: http://www.avicenne.com/articles_energy.php, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- ²⁴ Amprion GmbH (2015): Blindleistung, Wirkleistung. Online-Ressource, Link: <http://www.amprion.net/blindleistung-wirkleistung/>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- ²⁵ Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BJV, 2002): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) § 3 Begriffsbestimmungen. Online-Ressource, Link: http://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2002/_3.html, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- ²⁶ Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn, 2013): Studie Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit – Abschlussbericht. Online-Ressource, Link: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/eignung-von-speichertechnologien-zum-erhalt-der-systemsicherheit,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- ²⁷ Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn, 2013): Studie Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit – Abschlussbericht. Online-Ressource, Link: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/eignung-von-speichertechnologien-zum-erhalt-der-systemsicherheit,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- ²⁸ Dr. Rüdiger Paschotta/RP Photonics Consulting GmbH (2015): Netznutzungsentgelt. Online-Ressource, Link: <https://www.energie-lexikon.info/netznutzungsentgelt.html/>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- ²⁹ Klaus (2009): DeRegulierung der netzbasierten Infrastruktur – Identifikation und Analyse von Lenkungsinstrumenten im Rahmen von De-/Regulierungsvorgängen in Primärinfrastruktur-sektoren (Dissertation der Rechtswissenschaftlichen Fakultät der Universität Zürich). Books on Demand GmbH, Norderstedt – Seite 619f.
- ³⁰ 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 3.12.2015
- ³¹ 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_Beitrag_H_Hoefling.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt abgerufen am 30.11.2015
- ³² 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 3.12.2015
- ³³ Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG/photovoltaik – Solartechnik für Installateure | Planer | Architekten (2013): Mehr Schwung statt Masse. Online-Ressource, Link: <http://www.photovoltaik.eu/Archiv/Meldungsarchiv/Mehr-Schwung-statt-Masse,QUIEPTUzNzUwOCZNSUQ9MTEwOTQ5JIBBR0U9MQ.html>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- ³⁴ 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 3.12.2015
- ³⁵ 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 3.12.2015
- ³⁶ Korthauer et al. (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Science+Business Media S.A./Springer-Verlag Berlin Heidelberg – Seite 285f.
- ³⁷ Verband der Netzbetreiber VDN e.V. beim VDEW (VDN, 2007): Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Online-Ressource, Link: <http://www.vde.com/de/fnn/dokumente/documents/transmissioncode2007.pdf>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015
- ³⁸ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2015): Stromnetze der Zukunft – Stromnetze und Infrastruktur. Online-Ressource, Link: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Netze-und-Netzausbau/stromnetze-der-zukunft.html>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

³⁹Bundesamt 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 3.12.2015

⁴⁰Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2015): Stromnetze der Zukunft – Stromnetze und Infrastruktur. Online-Ressource, Link: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Netze-und-Netzausbau/stromnetze-der-zukunft.html/>, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

⁴¹Fraunhofer 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 3.12.2015

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
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.

