

# GESAMT-ROADMAP LITHIUM-IONEN-BATTERIEN 2030





# VORWORT



Die Vision einer emissionsarmen bzw. -freien und damit nachhaltigen Mobilität geht einher mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien. Energie- und Klimapolitik sind zentrale Treiber für die Realisierung dieser Vision. Dabei wird die zukünftige Weiterentwicklung einer optimierten Lithium-Ionen-Batterietechnologie entscheidend für die zeitliche Umsetzung sein. Denn alternative Technologien zur Ablösung der fossilen Ära im Transportsektor, welche zu einer klimaneutralen, energieeffizienten und flächendeckend wirtschaftlichen Mobilität führen können, sind praktisch nicht in Sichtweite. Die Lithium-Ionen-Batterie hat seit ihrer Einführung Anfang der 1990er Jahre in der Konsumelektronik eine ca. 25-jährige Entwicklung hinter sich, welche derzeit auf großformatige Batterien übertragen und weiter optimiert wird. In den nächsten 15 Jahren und darüber hinaus versprechen die Entwicklungspotenziale dieser Technologie, dass Kosten, Reichweiten, Tank-/Ladedauern von Elektrofahrzeugen in den Bereich konventioneller Fahrzeuge kommen können. Ein vollständiger Wechsel in eine rein elektrifizierte Mobilität kann also mit dieser Technologie gelingen. Gleichzeitig eröffnet eine damit einhergehende Kostenreduktion weitere Markteintritts- sowie -diffusionspotenziale jenseits der Elektromobilität, z. B. im Bereich der gleichzeitig wichtiger werdenden stationären Energiespeicherung.

Die vorliegende „Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ des Fraunhofer ISI zeigt diese Entwicklungsperspektiven auf und fasst die zentralen Ergebnisse von neun Roadmaps zusammen, welche im Rahmen der BMBF geförderten Innovationsallianz LIB2015 unter Beteiligung zahlreicher nationaler Experten aus Wissenschaft und Industrie entstanden sind. Die Roadmap

bildet damit eine Klammer um alle weiteren Roadmaps und zeigt ein umfassendes und konsistentes Bild auf, von der Entwicklung der Batterietechnologie für elektromobile und stationäre Anwendungen über die Marktentwicklung bis hin zu Treibern für die weitere Entwicklung und Implikationen, welche sich bis 2030 sowie in einem langfristigen Ausblick bis 2050 ergeben.

Ausgehend von einer Beschreibung der in den kommenden 15 Jahren erwarteten Technologieentwicklungen von Energiespeichern für die Elektromobilität und stationäre Anwendungen werden abhängige Entwicklungspfade aufgezeigt und schließlich Marktpotenziale der Lithium-Ionen-Batterien in den wichtigsten Anwendungen wie den unterschiedlichen Arten von Elektrofahrzeugen (z. B. Elektroautos, Elektrozweiräder, Busse, LKW etc.) und stationären Energiespeicheranwendungen (z. B. dezentrale PV-Hausbatterien oder große Speicher zur Integration Erneuerbarer Energien) quantifiziert. Eine batteriegebundene Elektromobilität wird sich demnach zwischen 2020 und 2030 etablieren und schließlich sukzessive verbreiten, mit enormen langfristigen Marktchancen für Lithium-Ionen-Batterien. Fragen nach der Reichweite möglicherweise kritischer Rohstoffe wie Lithium oder Kobalt sowie sonstiger ggf. limitierender Rahmenbedingungen sind daher wichtig und frühzeitig zu beantworten. Langzeit-Szenarien bis 2050 erlauben es in der Roadmap solche Fragen der Rohstoffverfügbarkeit zu adressieren und dabei z. B. den Einfluss des technischen Fortschritts der Lithium-Ionen-Batterie sowie Marktveränderungen zu berücksichtigen.

Die Roadmap gibt damit eine Orientierung, in welchem Technologieumfeld sich die Lithium-Ionen-Batterie je nach Anwendung bewegt, in welchem Verhältnis und mit welchen Entwicklungspotenzialen Anwendungen und Märkte zueinander stehen und welche rahmensetzenden Maßnahmen die Entwicklung der Batterietechnologie aber auch der Elektromobilität und stationäre Energiespeicherung voranbringen können.

Prof. Dr. Jens Tübke  
Abteilungsleiter Angewandte Elektrochemie  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Sprecher der Fraunhofer-Allianz Batterien

# EINLEITUNG

## GESAMT-ROADMAP LITHIUM-IONEN-BATTERIEN 2030

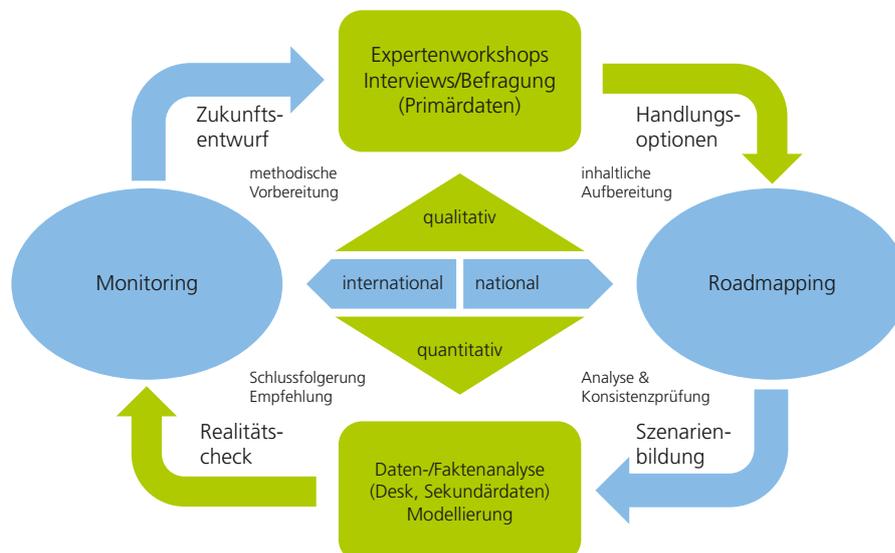
Die „Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen Batterien 2030“ aktualisiert und integriert die in 2010 erschienene „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen Batterien 2030“ und die in 2012 erschienene „Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“. Die Roadmap gibt einen umfassenden Überblick über den Stand und die Entwicklungspotenziale von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) für elektromobile und stationäre Anwendungen und bildet somit eine Klammer um die parallel erscheinenden Roadmaps „Energiespeicher für die Elektromobilität“ und „Stationäre Energiespeicher“.

Es werden die bis 2030 erwarteten Entwicklungen der LIB-Technologie und alternativer bzw. konkurrierender Energiespeicherlösungen skizziert und Abhängigkeiten zwischen Technologien für elektromobile und stationäre Anwendungen aufgezeigt. Das breite Spektrum heutiger und sich künftig entwickelnder Geschäftsmodelle und Marktsegmente wird bis ins Jahr 2030 quantifiziert. Langzeit-Szenarien bis 2050 erlauben es, technologiespezifische bzw. -abhängige Fragen der Rohstoffverfügbarkeit, des Einflusses des technischen Fortschritts der LIB sowie Marktveränderungen modellgestützt zu berücksichtigen.

## 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 (teilweise EU) Perspektive der Roadmap mit internationalen Entwicklungen, wodurch das Roadmapping durch ein Monitoring ergänzt und gestützt wird.

Das Vorgehen folgt den in der Grafik ange deuteten 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 aktorspezifisch 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 quantitative 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. akteurspezifisch zugeschnittene Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen ableiten zu können.

## **KERNAUSSAGEN**

Die LIB hat seit ihrer Einführung Anfang der 1990er Jahre in der Konsumelektronik eine rund 25-jährige Entwicklung hinter sich, welche aktuell auf großformatige Batterien unter intensiver Weiterentwicklung vom Material bis zum System und der Integration in spezifischen Anwendungen übertragen wird und in den kommenden 15 bis 25 Jahren zur völligen Reife entwickelt sein dürfte. Somit ergeben sich für die nächsten zwei Dekaden noch große Entwicklungspotenziale dieser Technologie, insbesondere mit Blick auf die Energiedichte (und damit Reichweite von Elektrofahrzeugen) sowie die Kostenreduktion. Die Verbreitung und Diffusion batteriegebundener Elektrofahrzeuge scheitert heute noch an höheren Kosten, zu niedrigen Reichweiten und weiteren Rahmenbedingungen, welche den vollwertigen Ersatz und damit Umstieg von herkömmlichen Automobilen mit Verbrennungsmotor für die gesamte Bevölkerung verhindern. Sukzessive können in den kommenden 5 bis 15 Jahren diese Kostennachteile verringert werden, bis 2030 Reichweiten denen eines heutigen Automobils mit Verbrennungsmotor nahekommen und bis jenseits 2030 parallel infrastrukturelle Herausforderungen gelöst werden. Ein vollständiger Wechsel in eine rein elektromobile Zukunft kann somit nach einem Markthochlauf bis 2030 schließlich zwischen 2030 und 2050 aus technischer Sicht gelingen, und dies bereits auf Basis einer optimierten LIB-Technologie.

Die Brennstoffzellentechnologie mit Wasserstoff als Energiespeicher ist ebenso vor diesem Zeithorizont zu betrachten und wird sich daher von einer heutigen komplementären Technologie (heute geringe Reichweiten der Batteriefahrzeuge vs. hohe Reichweiten von Brennstoffzellenfahrzeugen) zu einer klaren Konkurrenztechnologie entwickeln. Diese zunehmende Konkurrenzsituation erschwert auch trotz des Ausbaus Erneuerbarer Energien und Möglichkeiten einer „grünen“ Wasserstoffherzeugung den kostenintensiven und bislang unwirtschaftlichen Aufbau einer Wasserstoff- und Tankstelleninfrastruktur. Ob eine mit Wasser-

stoff betriebene Elektromobilität mit Brennstoffzellenfahrzeugen nicht nur technisch sondern auch wirtschaftlich darstellbar wird, wird zukünftig jeweils anhand regionaler Begebenheiten und im Kontext der jeweiligen Mobilitätskonzepte im Einzelnen zu prüfen sein. Zudem ist aber auch die vergleichsweise schlechte Effizienz bei der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff als hinderlich zu berücksichtigen.

Mit der Kostenoptimierung sowie dem langfristigen parallelen Ausbau fluktuierender Erneuerbarer Energien eröffnen sich sogar bis 2030 und später auch breite Marktpotenziale für die LIB-Technologie in neuen Bereichen stationärer Anwendungen.

Dennoch können neben der LIB potenziell disruptive Technologien wie die Lithium-Schwefel- (Li-S) oder Lithium-Feststoff-Batterie (Li-Feststoff) evtl. noch bessere Energiedichten und damit Reichweiten erzielen. Ihre (groß)produktionstechnische Realisierung unter den sich bis 2030 entwickelnden Anforderungen an höhere Reichweiten, weiterhin reduzierte Kosten und andere Parameter könnten jenseits 2030 gelingen und den Einsatz der LIB anschließend sukzessive ablösen. Hierzu sind aber kontinuierliche Anstrengungen in Forschung und Entwicklung (FuE) unter besonderer Berücksichtigung der anwendungsspezifischen Anforderungen notwendig. Dies beinhaltet auch ein fortlaufendes Monitoring und die Bewertung von sich abzeichnenden Entwicklungsmöglichkeiten bis 2030 und darüber hinaus die Analyse daraus folgender Implikationen.

Die Marktaussichten für die in vieler Hinsicht als Plattformtechnologie geltende LIB sind enorm: Die Nachfrage in 2015 liegt bei ca. 55–70 GWh, davon rund 40 GWh nach kleinformatigen Zellen in Konsumelektronikanwendungen, Power Tools etc. („mobile Elektronik“). Bereits heute stellen Elektrofahrzeuge (BEV, PHEV, LKW, Busse, 2-Räder etc.) einen Markt von 15–30 GWh dar (je nach Abgrenzung der „Elektromobilität“ und unter Berücksichtigung von Unsicherheiten der Markteinschätzung), welcher sich bis 2020 in etwa verdreifachen und bis 2030 um den Faktor 10 bis max. 30 (0,3–1 Terrawattstunden (TWh)-Bereich) ansteigen könnte. Bei gleichzeitiger Reduktion der Zellkosten um den Faktor 2 oder mehr in diesen Zeiträumen könnte der globale Markt bis 2030 kostenmäßig um den Faktor 5 bis 10 gegenüber 2015 steigen. Für LIB in stationären Energiespeichermärkten wird gegenüber heute rund 1–2 GWh Nachfrage ebenso eine Vielfachung erwartet, jedoch auf Grund eines breiten Technologieangebots für diverse und unterschiedlich große Teilmärkte auf im Vergleich deutlich niedrigerem Niveau als LIB für elektromobile Anwendungen. Bei einem tatsächlichen Gelingen einer elektromobilen Zukunft würde die Nachfrage nach Batterien für Elektrofahrzeuge mit mindestens 90 Prozent alle weiteren Segmente dominieren.

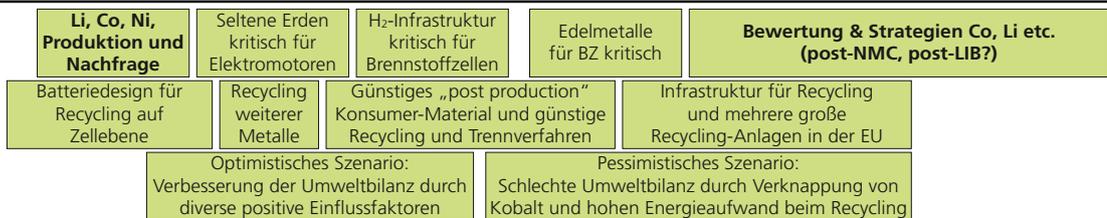
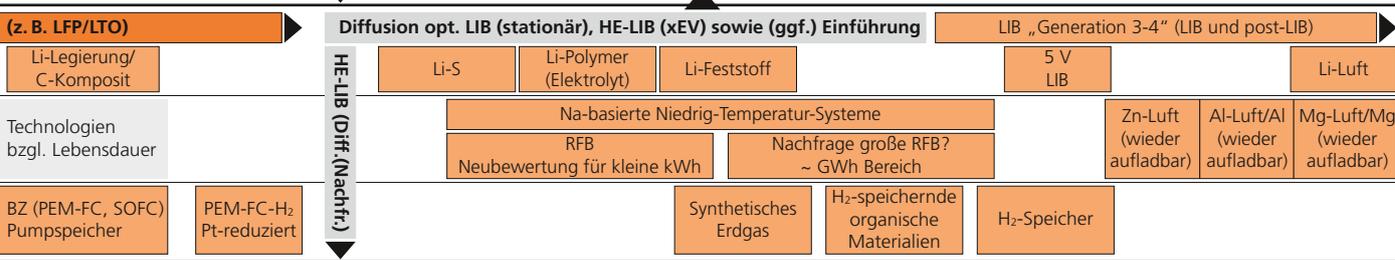
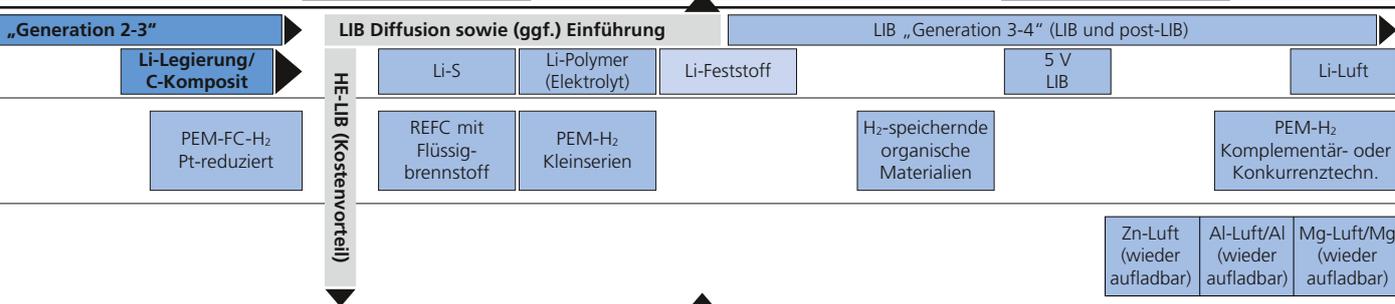
# GESAMT-ROADMAP

## LITHIUM-IONEN-BATTERIEN 2030

ZEIT →		2015			KURZFRISTIG	
ANWENDUNGEN & PRODUKTE	Anwendung (mobil, stationär)	Referenztechnologie	aktuelle/kurzfristige Alternativtechnologie(n)	LIB-Markt (global)* ~10-30 GWh	Technologien, Wachstum,	
	2-Räder (ebikes, scooter, pedelecs, motorbikes etc.)	2-Rad: Benzin, Mensch e-Rad: Pb, LIB	Pb (CN!), LIB (NMC)	~5 Mio, ~ kWh, ~10 GWh	30-100 Mio Elektro-2-Räder (2015-2030), (ebikes ~0,3-0,6 kWh, scooter ~2-3 kWh,	
	PKW (HEV)	PKW: Benzin/Diesel HEV: NiMH, LIB	NiMH/ LIB (LFP, NCA, NMC)	~1,5 Mio, ~1 kWh, 1-1,5 GWh (NiMH + LIB)	Marktanteil LIB 10-50% (NiMH dominiert), Beginn der Marktsättigung	
	PKW (PHEV)	Innovations- treiber	PKW: Benzin/Diesel PHEV: LIB	LIB (NMC, NCA, LFP)	~200-250 Tsd., ~10 kWh, 2-3 GWh	Breiteres Fahrzeug-Angebot, (für DE/EU PHEV <0,5% bis >1% der Neuzul. Welt
	PKW (BEV)		PKW: Benzin/Diesel BEV: LIB	LIB (NMC, NCA, LFP)	~200-250 Tsd., ~25 kWh, 5-7 GWh	Technische Ausdifferenzierung (Kosten-, BEV <0,5% bis >1% der Neuzul. Welt
	Nutzfahrzeuge (LV, Busse, LKW)	Nutzfahrzeuge: Diesel eFzg.: LIB, BZ	LIB (LFP, NMC, NCA), BZ	~x Tsd., ~50-250 kWh, ~ GWh	Übergang von Demoprojekten, Beschaff., von <<1 bis ~1% der Neuzul. Welt	
	Dezentrale PV Batterie-Systeme	LIB (50-70%), Pb (50-30%)	LIB (LFP/LTO, kostenopt.)	~10-100 Tsd., <10 kWh, ~0,1-0,5 GWh	Markthochlauf und -diff.: LIB wird wirt- Grid parity bei PV mit Energiespeicher,	
	Multi-Purpose Eigenbed.opt. und Peak Shaving	LIB (~70%), Pb (~30%)	LIB (LFP/LTO, kostenopt.)	begrenzte Stückzahlen 0,1-x GWh	Markteinführung: Markthochlauf:	
	Direktvermarktung erneuerbarer Energien	PV: LIB, Wind: (HT)	Adiabat. Druckluftspeicher LIB (LFP/LTO, kostenopt.)	PV-Windparks	Markthochlauf und adiabat. Druckl ggf.	
	Regelleistung	Rot. Massen (<sec), Prozessst. (s), Pumpsp. (m)	Superc. (<s), Schwungrad (s), Li-cap (<s), LIB (<s,s,m)	einzelne LIB	Markthochlauf mit State of Art und	
TECHNOLOGIEN xEV	Elektrochemisch: Li-basiert	Li-Polymer	LIB (NMC, NCA, LFP etc.) („Generation 2“)	LIB Diffusion sowie Einführung 4,3 V LIB	LIB 4,4 V LIB HE-(NMC)	
	Brennstoffzelle	PEM-FC Nafion/Pt	700 bar-Tank	Stack + System + H2-Tank 140 kWh	PEM-H2 Hunderte Demo-Fahrzeuge	SOFC Nutzfahrzeuge (z. B. LKW-APU)
	Nicht Li-basiert	(Pb)	(HT-Systeme Na/NiCl2 u. a.)	NiMH		
TECHNOLOGIEN ESS	Elektrochemisch: Li-basiert	LIB (LFP/Graphit, LFP/LTO, Li-Polymer etc.)		LIB Diffusion sowie Einführung 4,3 V LIB	optimierte LIB 4,4 V LIB HE-(NMC)	
	Elektrochemisch: Nicht Li-basiert	Pb, NaS (HT), ZEBRA (HT), NiMH, Redox Flow Batterie (RFB, MWh Speicher)		Bedingte Weiterentwicklungsmöglichkeiten der bzgl. RFB Kostenbewertung nach GF-Modellen und Unsicherheiten		
	Chemisch/elektrisch/mechanisch/sonstige	PHES, CAES, Schwungrad, H2/BZ, Supercaps		Nächste Generation Supercaps/Li-Caps, Adiabatische CAES, unkonventionelle		
TECHNOLOGIEBEZOGENE RAHMENBEDINGUNGEN	Rohstoffbedarf (Rohstoffkriticalität)	Kobalt hat signifikanten Anteil an Batteriekosten			Kobaltbedarf sinkt, Nickelbedarf steigt	
	Materialeffizienz (Recyclingfähigkeit)	Pilotanlagen für Batterie-Recycling von Co und Ni	LIB-Recycling: Co, Ni, Cu Al	Batteriedesign für Recycling auf Systemebene	Kostengünstige LIB-Produktion durch geringe Materialreinheit?	
	Energiebedarf (LCA) (CO2-Footprint)	Hoher Energiebedarf und schlechte Umweltbilanz bei Produktion von Kobalt und Graphit				
	Technologische Synergien	Technologieplattform für LIB			Mechanische Inkompatibilität von RFB zu Standard-Zellen	

Angaben/Märkte (Stückzahlen, Batteriegröße, Zellnachfrage) bezogen auf LIB und Welt sofern nicht DE explizit benannt

MITTELFRISTIG	2020	LANGFRISTIG	2030	>2030
Diffusionsgrad	LIB-Markt (global)* ~50-100 GWh	Technologien, Wachstum, Diffusionsgrad	LIB-Markt (global)* ~0,3-1 TWh	Diffusionsgrad, Trend
LIB Penetration 15-30 % (emotorbikes ~8-15 kWh)	~10 Mio., ~ kWh, >10 GWh	zunehmende Verbreitung	~x*10 Mio., ~ kWh, ~x*10 GWh	Diffusion
~2% HEV an Neuzul. Welt (für DE/EU kaum relevanter Markt)	~1 Mio, je ~1 kWh, ~1 GWh (NiMH + LIB)	Marktanteil LIB 50-90 % Sättigung bzw. Rückgang HEV (~1 % d. Neuzul.)	<1 Mio, je ~1 kWh, <GWh LIB Markt	~100 % LIB HEV verschw.
relevanter Übergangsmarkt) (EU ~1/3, DE ~5 %)	~0,5-1,5 Mio, je ~10 kWh, 5-15 GWh	Diffusion (mit HE-LIB) und Beginn der Sättigung PHEV ~1-5 % der Neuzul. Welt	~1,5 Mio, je ~10 kWh, <100 GWh	Sättigung, Rückgang
Reichw. optimiert, Zukunftsmarkt! (EU ~1/3, DE ~5 %)	~0,5-1,5 Mio, 25-40 kWh, 20-60 GWh	Technologiereifung (HE-LIB), Diffusionsbeginn BEV ~1-10 % der Neuzul. Welt	~5-10 Mio, 25-60 kWh, 0,1-1 TWh	Diffusion (globaler Wandel)
Flotten zu breiterem Einsatz	~x*10 Tsd., ~50-250 kWh, ~x GWh	~1-5 % der Neuzul. Welt mit Elektro-Nutzfahrzeugen BSZ tendenziell Nische (Busse, LKW)	~1 Mio?, ~50-250 kWh, ~100 GWh	Diffusion (folgt BEV)
schafflicher (LIB dominiert Pb) DE: ~40 Tsd. Niveau ab 2016	~100 Tsd., <10 kWh, ~ GWh	Diffusion: Kostenvorteil opt. LIB, HE-LIB aus xEV Neubewertung: RFB, NaS (NT)?	~1 Mio, <10 kWh, ~10 GWh	Diffusion
>5 MW (LIB) 0,1-1 MW (LIB)	begrenzte Stückzahlen 0,1-x GWh	Diffusion: Kostenvorteil opt. LIB, HE-LIB aus xEV Neubewertung: RFB, NaS (NT)?	Tausende? * MWh = x GWh Level?	begrenzte Stückzahlen
Beginn der Diffusion, zeitnahe Game changer?	Kompetitiv für LIB aber wachsender Markt	Diffusion: Kostenvorteil ad. Druckl., opt. LIB, RFB Neubewertung: NaS (NT), H <sub>2</sub> aus übers. Energie?	LIB Markt ~ x GWh Level?	Diffusion
ggf. alternative Technologien	LIB?	Diffusion, LIB als Alternative ggf. zu spät wirtsch.	LIB Marktanteil aber ggf. sehr klein	Marktsättigung



# ENERGIESPEICHERTECHNOLOGIEN

## ENERGIESPEICHERTECHNOLOGIEN FÜR ELEKTROMOBILE ANWENDUNGEN

Für zukünftige Anwendungen in der Elektromobilität und stationären Energiespeicherung kommen auf Grund unterschiedlicher spezifischer Vorteile und Reifegrade unterschiedliche (elektrochemische) Energiespeichertechnologien in Frage. In den „Technologie- und Gesamt-Roadmaps Energiespeicher für die Elektromobilität und stationäre Energiespeicher“ wurden bis auf der Systemebene (Technologie-Angebotsseite und noch nicht für die anwendungsspezifischen Anforderungen optimiert) zentrale Entwicklungen von Energiespeichertechnologien betrachtet, welche aktuell (Stand der Technik) bzw. potenziell zukünftig in Elektrofahrzeugen und stationären Speichersystemen eingesetzt werden können. Dabei kann es je nach Technologie(reife) für die Vorbereitung der spezifischen Anwendung bzw. Erfüllung des spezifischen Anforderungsprofils, der produktionstechnischen Umsetzung in Serie und der Integration in der Anwendung noch zu weiteren Verschiebungen um 2 bis 3 Jahre (existierende Produktionsplattform), 5 bis 8 Jahre oder länger (ohne heute existierende Produktionsplattform) kommen. Für beide Anwendungsbereiche werden hier die wesentlichen abhängigen und unabhängigen/spezifischen Entwicklungslinien zusammengefasst.

### Li-basiert

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) mit NMC-, NCA-, oder LFP-Kathode und Graphit-Anode (teilweise auch LMO-NMC mit Blends oder vereinzelt LFP/LTO etc.) aber auch Lithium-Polymer-Batterien (Li-Polymer) stellen den Stand der Technik und die Referenztechnologie für xEV (HEV, PHEV und BEV) in PKW sowie zahlreiche weitere elektromobile Anwendungen (z. B. ebikes, Busse, Transporter etc.) dar. Dies sind die in den bis 2015 über 1 Million Elektroautos (BEV/PHEV) verbauten Batterien. Sie werden (siehe „Technologie-Roadmap Energiepeicher für die Elektromobilität 2030“ sowie Studien der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE)) als LIB der Generation 2 bezeichnet (Generation 1 bezeichnet in der Regel kleinformatige Gerätezellen für Konsumelektronikanwendungen, z. B. in Laptops).

Für inkrementell bzw. evolutionär verbesserte großformatige LIB-Systeme wie Hochenergie (HE)-LIB (z. B. NMC oder NCA Kathoden und SiC Komposit-Anoden) oder Hochvolt (HV)-Entwicklungen mit 4,2/4,3/4,4 Volt sind Verbesserungen in der Energiedichte (gravimetrisch und volumetrisch) sowie eine Kostenreduktion (z. T. durch reduzierten Materialeinsatz, Senkung in Produktionskosten durch Lerneffekte und Hochskalierung etc.) zu erwarten. Diese Entwicklungen werden als LIB der Generation 3 zusammengefasst und werden neben den aktuell in Elektrofahrzeugen verbauten Systemen in den kommenden (ggf. sogar mindestens) 10 bis 20 Jahren sukzessive in den Markt kommen und gegenüber früheren Generationen breiter diffundieren (d. h. es gibt aber eine Ko-Existenz und die Marktanteile in den jeweiligen Anwendungen steigen).

HV (4,4 bis 5 Volt)-LIB, Li-Feststoff-, Li-S bis Lithium-Luft (Li-Luft)-Batterien stellen Zukunftstechnologien dar, welche je nach Anforderungsprofil einer konkreten Anwendung (z. B. an die kalendrische und zyklische Lebensdauer, Energie- und Leistungsdichte etc.) für die Elektromobilität als relevant einzustufen, jedoch prinzipiell vor einer langfristigen Zeitskala (eher jenseits 2030 in konkreten Anwendungen) zu sehen sind. Beispielsweise sind produktionstechnische Fragen und Entwicklungen bei Li-Feststoff oder die begrenzte Lebensdauer von Li-S noch Herausforderungen, jedoch können auch begrenzte volumetrische Energiedichten, begrenzte Leistungsdichten etc. Parameter darstellen, welche den Einsatz einer Li-S in einem Elektrofahrzeug sogar gänzlich verhindern. In Elektrofahrzeugen sind diese Technologien (mit Ausnahme der HV-LIB als Post-LIB oder Generation 4 bezeichnet) vor 2030 prinzipiell nicht im Einsatz zu erwarten.

### Brennstoffzelle

Die PEM-Brennstoffzelle mit 700 bar-Tank (Wasserstoffspeicher) ist Referenztechnologie für Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) mit typischerweise rund 140 kWh Systemgröße. Sie stellt aus heutiger Sicht durch das Erreichen hoher Reichweiten eine Komplementärtechnologie zu LIB-basierten Elektrofahrzeugen mit in der Regel geringer Reichweite dar.

Neben einigen hundert Pilot- und Demonstrationsfahrzeugen (in Europa, Japan, Korea, USA)<sup>1</sup> stehen der Verbreitung von FCEV jedoch noch größere Herausforderungen im Weg. Hierzu zählen u. a. die hohen Herstellungskosten für die Brennstoffzellen(-systeme) (z. B. die Platinreduktion ist daher weiterhin FuE-Gegenstand) und schließlich Kosten der FCEV, geringe Wirkungsgrade in der Wasserstoffherstellung (z. B. PEM-Elektrolyse heute bei 65 bis 67 Prozent und bis 2050 ggf. bis 80 Prozent)<sup>2</sup> sowie Rückverstromung (z. B. bis 60 Prozent PEM-FC, 50 bis 70 Prozent SOFC)<sup>3</sup>, Optimierungspotenziale bzgl. der Brennstoffzellen-Lebensdauer sowie die noch fehlende „grüne“ Wasserstoffinfrastruktur (gekoppelt an den Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE)) und auch die kostenintensive Wasserstofftankstelleninfrastruktur. Damit liegen Herausforderungen auf allen Bereichen von der Wasserstoffherstellung (z. B. Elektrolyse), Wasserstoffspeicherung (z. B. neben Druckgasbehältern könnten künftig auch H<sub>2</sub>-speichernde organische Materialien weiter entwickelt sein) sowie der Rückverstromung vor.

Kosten können (ebenso wie für LIB) durch Skaleneffekte und hohe verkaufte Stückzahlen (FCEV) reduziert werden, jedoch bleibt die Entwicklung einer Wasserstoff/Brennstoffzellen-basierter Mobilität kontrovers diskutiert und ist ganz klar im Kontext der Entwicklungspotenziale der batteriebasierten Elektromobilität und dem Ausbau der EE neben den anderen genannten Herausforderungen zu bewerten. Die Zukunftschance der FCEV wird sich daher vermutlich spätestens zwischen 2020 und 2030 entscheiden.

Denn mit der Entwicklung von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen hoher Reichweite ist zudem zu erwarten, dass sich mit Verzögerung einer FCEV-Verbreitung die LIB zu einer klaren Konkurrenztechnologie zu FCEV entwickeln werden. Dabei könnten Brennstoffzellenfahrzeuge aber auch neben PKWs in Nutzfahrzeugen wie Bussen und LKWs weitere Verbreitung finden. Mögliche Entwicklungen neben reinen FCEV sind z. B. auch SOFC-basierte Nutzfahrzeuge (z. B. LKW-APU)<sup>4</sup> oder auch Range extender fuel cell-Elektrofahrzeuge (REFC). Als Flüssigbrennstoffe kommen dafür neben Wasserstoff auch Methanol oder andere Alkohole in Frage.

Insgesamt werden bis 2020 bestenfalls FCEV in Kleinserien (ggf. einige Tausend bis max. 100 000 im weltweiten Bestand) erwartet. Dokumentierte (eher politisch motivierte) Planungen<sup>5</sup> stellen rund 0,5 Millionen FCEV bis 2020 (Bestand) in Aussicht.

### **Nicht-Li-basiert**

NiMH werden weiterhin in HEV eingesetzt, dort jedoch zunehmend durch kostenreduzierte LIB substituiert. Blei-Säure-Batterien (Pb) sind heute und kurzfristig weiterhin im Einsatz in Traktions-

anwendungen (z. B. in Entwicklungsländern, dort NICHT als Starter-Batterie).

Bei Nicht-Lithium-basierten Batterietechnologien sind auch die Hochtemperatur-Systeme erfasst, z. B. NaNiCl<sub>2</sub>- bzw. die ZEBRA-Batterie. In Nutzfahrzeugen bzw. Bussen werden sie teilweise eingesetzt. Redox-Flow-Batterien (RFB) waren einmal für den Einsatz in der Elektromobilität in der Diskussion, sind aber besser für die stationäre Energiespeicherung geeignet. Vor allem Vanadium-basierte RFB (VRFB) bringen nicht die geforderte Energiedichte. Spielt die Energiedichte allerdings keine Rolle, hat das Batteriesystem den großen Vorteil der einfachen Betankung und Sicherheit.

Es ist zu erwarten, dass diese (Nicht-Li-basierten) Batterietypen in Anwendungen der Elektromobilität bald verschwinden bzw. ggf. in Nischenanwendungen verbleiben. Langfristig (jenseits 2030) bleibt es aber offen, ob sich neben den hier skizzierten LIB-Entwicklungen (Generation 2 und 3) und Brennstoffzellen/Wasserstoffspeicher-basierten Komplementär bzw. Konkurrenztechnologien jenseits 2030 Batterien (Generation 4) oder Antriebe/Technologien anderer Art entwickeln und durchsetzen können, um das Zeitalter der „fossilen“ Mobilität abzulösen.

In dem Zeitraum bis 2030 jedoch werden auch Optionen wie LKW mit Oberleitung, Supercaps für Stop and go-Anwendungen etc. diskutiert bzw. realisiert. Jedoch werden diese Lösungen als singuläre bzw. für einzelne Konzepte und Anwendungen spezifische Optionen in dieser Roadmap nicht vertiefend diskutiert.

## **ENERGIESPEICHERTECHNOLOGIEN FÜR STATIONÄRE ANWENDUNGEN**

Mit Blick auf Energiespeichertechnologien für stationäre Anwendungen ist ein deutlich breiteres Technologieportfolio zu betrachten. Anders als für die Elektromobilität mit besonderen Anforderungen an höchste Energiedichten können hier je nach Anwendungsfall ganz unterschiedliche Parameter im Vordergrund stehen (in der Regel ist dies neben Kosten ganz besonders die Lebensdauer, sowohl kalendarisch als auch zyklisch).

Weiterhin muss sich eine breitere Marktnachfrage (wie bei Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor) für eine stationäre Energiespeicherung erst ergeben. Heute können ganz unterschiedliche Flexibilisierungsoptionen wie Energiemanagement, Netzausbau etc. aber auch eine für viele Anwendungen noch vorliegende Unwirtschaftlichkeit der Energiespeicherung (d. h. es ist evtl. günstiger erzeugten Strom zu verlieren und nicht zu speichern) einer breiten Nachfrage im Weg stehen. Die steigende Nachfrage nach stationärer Energiespeicherung ist daher eng mit dem Ausbau fluktuieren-

ZEIT →		2015				KURZFRISTIG				
TECHNOLOGIEN xEV	Elektrochemisch: Li-basiert	Li-Polymer		LIB (NMC, NCA, LFP etc.) („Generation 2“)		LIB Diffusion sowie Einführung 4,3 V LIB		LIB 4,4 V LIB HE-(NMC) ▶		
	Brennstoffzelle	PEM-FC Nafion/Pt	700 bar- Tank	Stack + System + H2-Tank 140 kWh	PEM-H2 Hunderte Demo- Fahrzeuge	SOFC Nutzfahrzeuge (z. B. LKW-APU)				
	Nicht Li-basiert	(Pb)		NiMH						
		(HT-Systeme Na/NiCl2 u. a.)								
TECHNOLOGIEN ESS	Elektrochemisch: Li-basiert	LIB (LFP/Graphit, LFP/LTO, Li-Polymer etc.)				LIB Diffusion sowie Einführung 4,3 V LIB		optimierte LIB 4,4 V LIB HE-(NMC)		
	Elektrochemisch: Nicht Li-basiert	Pb, NaS (HT), ZEBRA (HT), NiMH, Redox Flow Batterie (RFB, MWh Speicher)				Bedingte Weiterentwicklungsmöglichkeiten der bzgl. RFB Kostenbewertung nach GF-Modellen und Unsicherheiten				
	Chemisch/elektrisch/ mechanisch/sonstige	PHES, CAES, Schwungrad, H2/BZ, Supercaps				Nächste Generation Supercaps/Li-Caps, Adiabatische CAES, unkonventionelle				

der Erneuerbarer Energien verbunden, da eine Speicherung der Energie bei sehr hohen Anteilen an Überschussstrom wirtschaftlicher bzw. wahrscheinlicher nachgefragt wird, und auf einer langfristigen Zeitskala zu sehen.

Da sowohl Klimapolitik (z. B. Gesetzgebung bzgl. CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion) als auch Energiepolitik (z. B. Ausbau „grüner“ Erneuerbarer Energien) Treiber für die Entwicklung und Nachfrage elektromobiler und stationärer Energiespeicher und zudem hochgradig zeitlich und hinsichtlich der Anreize voneinander abhängig sind, ergeben sich auch bei den technischen Entwicklungspotenzialen und Lösungen klare Abhängigkeiten bzw. Synergien:

### Li-basiert

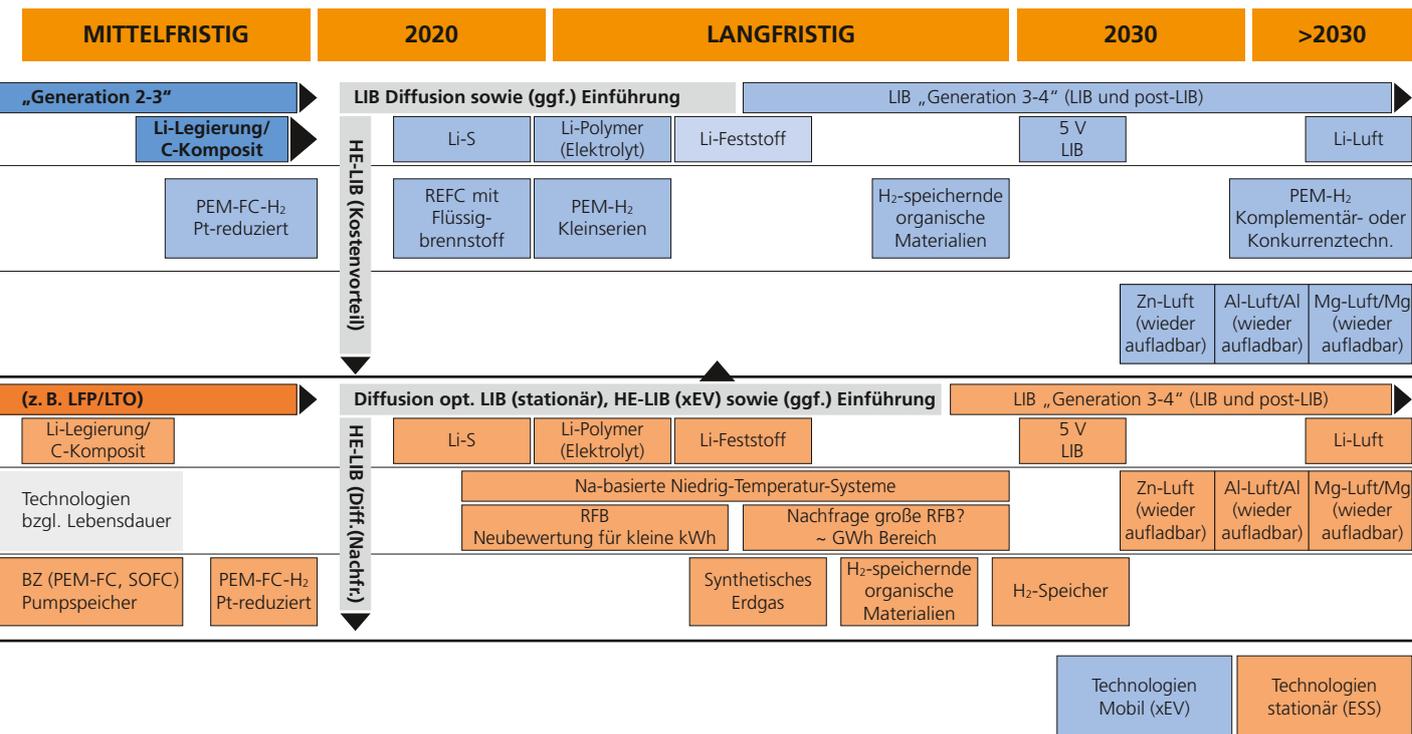
Heute stellen in erster Linie günstige LIB-Zellchemien ohne hohe Energiedichte wie beispielsweise Lithium-Eisenphosphat (LFP) (günstig und zyklenstabil) oder aber auch Lithium-Mangan-Oxid (LMO) Referenztechnologien dar. Auf teure Materialien wie Kobalt, Nickel und entsprechend NMC- oder NCA-basierte Kathoden wird in der Regel noch eher verzichtet. Jedoch gewinnen auch diese Zellchemien – sofern günstig und mit hoher garantierter Lebensdauer von Zellherstellern angeboten – bereits an Bedeutung. In dezentralen Anwendungen (z. B. <10kWh-Hausspeicher) werden (neben Pb) aber hauptsächlich LIB auf Basis von LFP/Graphit eingesetzt (siehe „Gesamt-Roadmap stationäre Energiespeicher 2030“).

Durch die Verwendung von Lithium-Titanat (LTO)-Anoden anstelle Graphit können mit LFP/LTO-Batterien deutlich höhere kalendarische und zyklische Lebensdauern erreicht werden, sodass sich über die Lebensdauer hinweg bzw. mit Bezug auf die in einer Anwendung ausgespeicherte Energie in kWh deutliche Potenziale einer in Bezug auf Kosten und Lebensdauer optimierten LIB ergeben.

Eine Diffusion dieser LIB-Technologie ergibt sich gerade in kleineren dezentralen Speichersystemen in den kommenden Jahren gegenüber einer heute in der Regel wegen der geringen Investitionen noch attraktiveren Pb.

Für andere Li-basierte Batterien (der Generation 3 und 4) gelten die Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität als ganz klarer Treiber. Nur wenn hier Technologien mit stark reduzierten Kosten (die Energiedichte ist bei stationären Anwendungen in der Regel weniger kritisch bzw. relevant) verfügbar werden, sowie weitere anwendungsspezifische Anforderungen erfüllt sind (z. B. an die Lebensdauer), werden diese zunehmend für den stationären Einsatz attraktiv.

Auf Basis der in der Elektromobilität erwarteten Kostensenkungspotenziale großformatiger LIB-Zellen auf unter 200 €/kWh um 2020 und unter 100 €/kWh um 2030 wird angenommen, dass Hochenergie (NMC- oder NCA-basierte)-LIB in diesem Zeitraum auch für stationäre Anwendungen zunehmend wirtschaftlich und damit nachgefragt werden.



## Nicht Li-basiert

Heute ist das Portfolio nicht-Li-basierter Batterien in stationären Anwendungen groß (siehe „Technologie-Roadmap stationäre Energiespeicher 2030“). Pb sind für kleinere (kWh) PV-Hausbatterien aber besonders in der Unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV), Stand-by und Telekom Anwendungen auf Grund geringer Zell/ Systemkosten (pro kWh Investition) weiterhin attraktiv, Hochtemperatur (NaS, ZEBRA)- und RFB werden in Anwendungen größerer (MWh-)Speicherklassen eingesetzt und rechnen sich bei längeren Entladezeiten (ab mehreren Stunden).

Jedoch sind bei diesen Technologien die künftigen Entwicklungspotenziale entweder gering (z. B. Pb mit geringen Potenzialen der Optimierung von Kosten und Zyklenzahl) oder eine Bewertung fällt schwer (z. B. Unsicherheiten in der Langzeitstabilität und damit Risiko bzgl. der Eignung für Anwendungen im kWh-Bereich sowie Bewertung der Wirtschaftlichkeit bei RFB) etc. Daher sind die technische Entwicklung ebenso wie die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFB oder auch Na-basierten Niedrig-Temperatur-Systemen langfristig im Auge zu behalten und bei veränderten Erkenntnissen neu zu bewerten. Gleiches gilt für nicht-Li-basierte Metall-Luft-Batterien.

Neben LIB gelten somit aber Pb, RFB, und Na-basierte Hochtemperatur (HT)-Batterien als die heute zentralen elektrochemischen Speichertechnologien für stationäre Anwendungen. Es wäre durchaus zu erwarten, dass auch langfristig alle diese Technologien ihre (wie in der „Technologie-Roadmap stationäre Energie-

speicher 2030“ aufgezeigten) spezifischen Anwendungen in entsprechenden Speicherklassen haben werden, mit Ausnahme der LIB, welche getrieben durch Fortschritte in der Elektromobilität einzelne dieser Technologien bzw. ihrer Märkte substituieren könnte und ein breiteres Anwendungspotenzial erwarten lässt.

## Chemisch/Elektrisch/Mechanisch/Sonstiges

Jenseits der elektrochemischen Energiespeicher gelten heute und sicherlich auch künftig Kurzzeitspeicher wie Schwungräder und Supercaps sowie Großspeicher (u. a. PHES und CAES) und Langzeitspeicher wie Wasserstoff zu dem weiteren Portfolio stationärer Speichertechnologien (z. B. auch thermische und weitere hier nicht vertiefte Energiespeichertechnologien).

Entwicklungspotenziale ergeben sich bei kommenden Generationen von Supercaps bzw. Li-Caps (Hybridkonzept zwischen Supercaps und LIB) mit hoher Energiedichte, Brennstoffzellen (z. B. PEM, SOFC wie für elektromobile Anwendungen diskutiert) für BHKW- Anwendungen, kostengünstige adiabatische CAES, unkonventionelle Pumpspeicher, etc. Die Anwendungsbereiche dieser Technologien liegen oftmals jedoch auch außerhalb der Einsatzbereiche von LIB und sind daher eher als Ergänzung und weniger direkte Konkurrenztechnologie zu sehen (siehe „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“).

Die Speicherung von synthetischem Erdgas (im Erdgasnetz) oder Wasserstoff (in geologischen Formationen) sind langfristig (2020 oder gar 2030) zu erwarten.

# FuE-AKTIVITÄTEN ZU LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

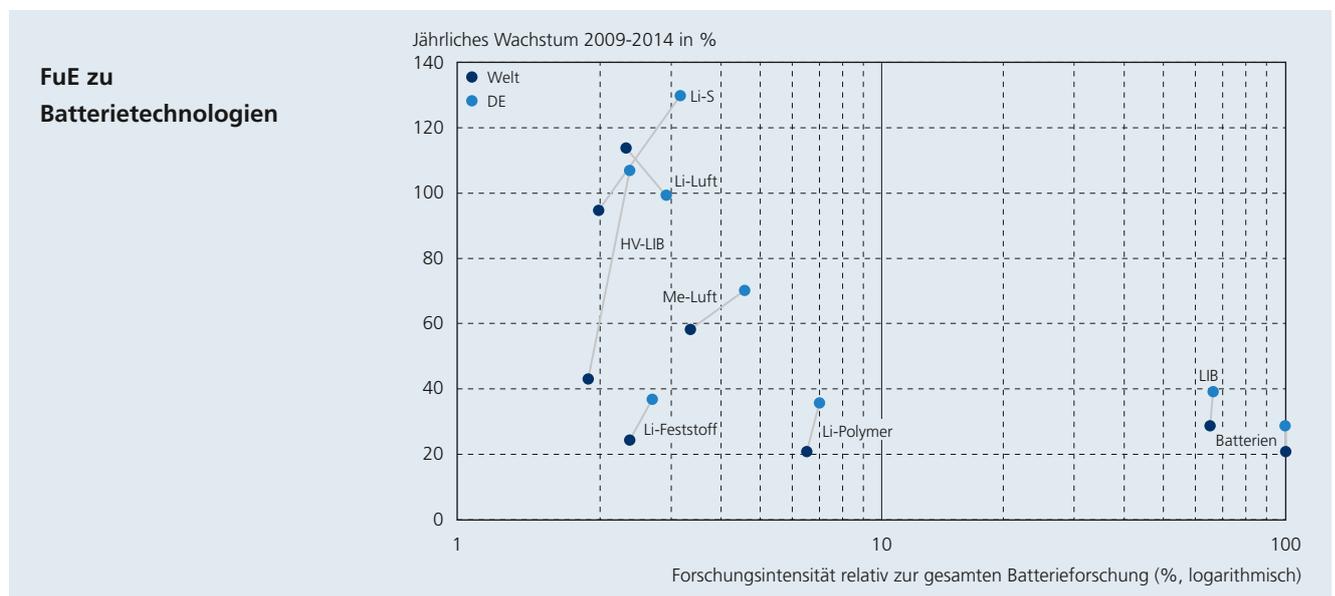
Die FuE-Aktivitäten zu stationären Energiespeichertechnologien wurden in der „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ anhand von Publikations- und Patentanalysen vergleichend betrachtet und geben im Wesentlichen die Entwicklungspotenziale (Dynamik) aber auch den aktuellen Stellenwert (relative Größe/Aktivität der Publikationen und Patentanmeldungen) der genannten Technologien wieder. Die Analysen bestätigen die Entwicklungspotenziale eines breiteren Technologieportfolios für stationäre Anwendungen wie zuvor beschrieben.

Da LIB sowohl mit Blick auf die Elektromobilität als auch in vielen Speicherklassen und Anwendungsfeldern stationärer (dezentraler, lokaler sowie klein bis mittelgroßer) Energiespeicher vom kWh- bis in den MWh-Bereich eine ganz zentrale Rolle spielen, sollen in dieser Roadmap die FuE-Aktivitäten in Deutschland sowie im weltweiten Vergleich anhand von Publikationsanalysen näher betrachtet werden. Die in der „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ beschriebenen hierarchisch aufgebauten Suchstrategien (Datenabfrage im Web of Science (WoS) für die letzten fünf Jahre) erlauben einen direkten Vergleich der Batterietypen, LIB-Komponenten sowie Materialentwicklungen im Bereich einzelner Zellkomponenten. Die Forschungsintensität (Anzahl der Publikationen in diesem Zeitraum) ist für Batterien

auf 100 normiert. Für die Abbildung zu LIB-Komponenten gilt die Normierung auf LIB insgesamt (= 100), für Kathoden, Anoden, Elektrolytforschung gilt die Normierung in Bezug auf die jeweiligen Komponenten (siehe Abbildungen rechte Seite).

Im Bereich der Batterieforschung dominiert die FuE an LIB mit 60 bis 70 Prozent der Publikationen sowie einem dynamischen Wachstum von 30 Prozent (Welt) bzw. 40 Prozent (Deutschland). Li-S und Li-Luft waren in den letzten Jahren internationaler FuE-Gegenstand. In Deutschland lag dabei ein vergleichsweise starker Fokus auf der FuE an HV-LIB. Li-Polymer und Li-Feststoff haben (auf entsprechend geringem Niveau) eine mit LIB insgesamt vergleichbare Dynamik gezeigt. Dies könnte sich durch den aktuellen Fokus auf Li-Feststoff-Batterien in den kommenden Jahren ändern.

Mit Blick auf LIB-Komponenten ist international ein starker Fokus auf die Kathoden- und Anodenforschung aber auch die Zell- und Elektrolytforschung zu beobachten. Im Vergleich jedoch weniger auf die Systemebene und Separatoren (diese aber mit hoher Dynamik). In Deutschland ist dabei eine konzentrierte Forschung mit hoher Dynamik und Fokus auf die Zellforschung zu beobachten.



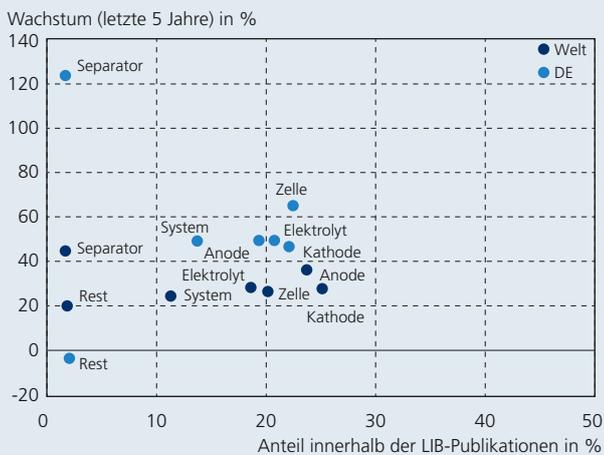
Im Bereich der Kathodenforschung (nicht zwingend reine Materialforschung) nehmen Publikationen zu LFP noch vor anderen Kathoden den größten Raum ein. Deutlich heraus sticht der viel höhere Anteil ebenso wie die Dynamik der NMC Forschung in Deutschland im Vergleich der weltweiten Aktivitäten. Dies bestätigt genau die in der Roadmap aufgezeigten FuE-Schwerpunkte besonders aus deutscher Sicht. Der hohe Anteil der LFP Forschung kann sich durchaus durch starke Akteure im Bereich von LIB für stationäre Anwendungen und Bereiche jenseits der Zellfertigung für elektromobile Anwendungen erklären und ist zudem nicht auf die reine Materialforschung zu beziehen.

Im Bereich der Anodenforschung dominieren weiterhin Publikationen zu Graphit (bzw. Anoden auf Graphitbasis), besonders in Deutschland in Bezug auf Anteil und Dynamik. Neben LTO (Bezug wieder zu stationären Speichern und Akteuren in Deutschland) nimmt die Forschung an Anoden mit Kompositmaterialien und Legierungen eine in Deutschland besonders hohe Dynamik ein.

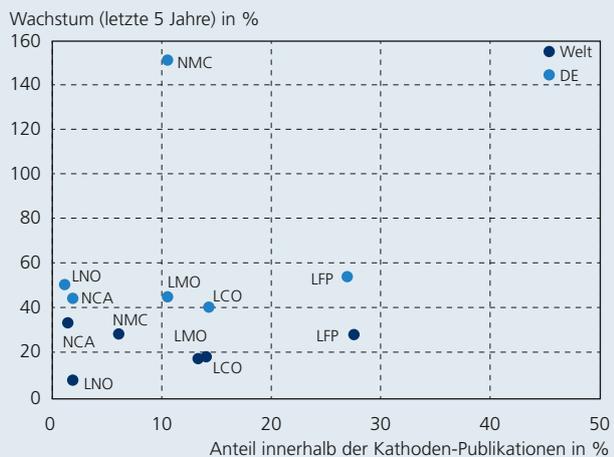
Für die Elektrolytforschung wird das bei Betrachtung der Batterietypen gewonnenen Bild verstetigt: Neben organischen Karbonaten (mit Lithium-Hexafluorophosphat, LiPF<sub>6</sub>) als „klassischem“ Elektrolyt sowie Polymerelektrolyten (diese sind sogar international stärker betont) nehmen Festelektrolyte in den letzten Jahren eine deutlich geringere Rolle ein, was sich in den kommenden Jahren ändern könnte. Der Fokus jüngster Forschung zeigt sich wieder gerade in Deutschland mit einer extrem hohen Dynamik bei HV-Elektrolyten, Additiven (zu organischen Karbonaten) sowie Gelpolymerelektrolyten.

Für die kommenden Jahre dürfte eine wie in der Roadmap gezeigte Konsolidierung und weitere Konzentration auf HE (NMC)-Kathoden, Legierung/Komposit-Anoden, sichere (Fest-)Elektrolyte und LIB-Zellforschung zu erwarten sein. Auch die Forschung an Post-LIB (z. B. Li-S, Li-Luft) dürfte und sollte sich verstetigen. Im internationalen Vergleich hat Deutschland in den hier gezeigten Bereichen die Chance sich weiter zu etablieren und FuE-Ergebnisse in die Anwendung zu bringen.

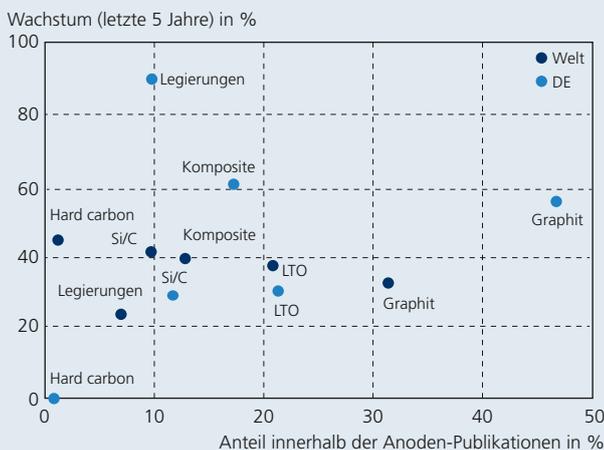
### FuE zu Lithium-Ionen-Batterien (LIB)



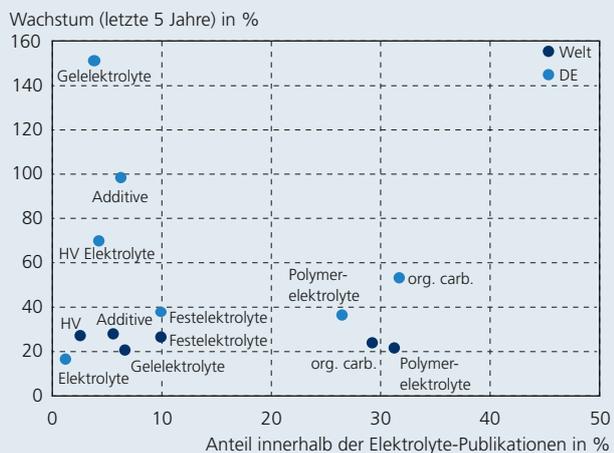
### FuE zu LIB-Kathoden



### FuE zu LIB-Anoden



### FuE zu LIB-Elektrolyten



# ANWENDUNGEN UND PRODUKTE

Großformatige Lithium-Ionen-Batterien (LIB) spielen sowohl für elektromobile als auch für stationäre Anwendungen eine zentrale Rolle, da sie mit ihrem technischen (insbesondere Energiedichte, Lebensdauer) sowie ökonomischen (Kostensenkung) Entwicklungspotenzial als Plattformtechnologie breit einsetzbar sind. Wenn LIB aber, wie zuvor anhand der Technologieentwicklungspfade gezeigt, noch in den nächsten 15 und mehr Jahren derartige Entwicklungspotenziale aufweisen, dann sind fokussierte und anwendungsnahe FuE Anstrengungen aber auch mit Blick auf die sich zukünftig ergebenden Marktchancen eine verstärkte Produktionsforschung und ein Aufgreifen der Entwicklungen durch die Industrie notwendig, wenn sich Deutschland in diesen Zukunftsmärkten wettbewerbsfähig positionieren will.

Die heute schwache Position Deutschlands in der Zellfertigung ist bekannt, hier dominieren asiatische Hersteller wie LG Chem Ltd., Samsung SDI, Panasonic Corp. und Weitere. Jedoch ist Deutschland stark in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen/-bereichen (wie dem Anlagen- und Maschinenbau, der Chemieindustrie) sowie der Systemintegration (Pack-, Modul-, Systemherstellung) und anderen nachgelagerten Dienstleistungen. Mit sich weiter entwickelnden Märkten wird sich daher zunehmend die Frage stellen, wie stark Deutschland oder Europa künftig von einer Zellproduktion abhängig sein wird. Denn Wertschöpfung lässt sich zunächst auf allen Ebenen vom Material bis zum Produkt erzielen.

Für die LIB-Zelle wird eine Wertschöpfung mit der Kostenreduktion abnehmen, weshalb es zunehmend wichtig sein wird, die jeweiligen Anwendungen und Produkte, ihre Marktentwicklungen, die Diffusion der LIB innerhalb der Anwendungen sowie ihre Wertschöpfung in den Produkten abzusehen und zu verstehen. Auch die strategische Bedeutung der Märkte und Zugang für Marktteilnehmer in Deutschland sind wichtige Fragen, die es zu beantworten gilt. Nur so können diese nachhaltig unterstützt werden und neben dem deutschen Markt auch Exportchancen auf- und ausbauen.

Hinsichtlich der FuE an zukünftigen LIB sowie Energiespeichertechnologien insgesamt bleibt jedoch für die der Zellfertigung

vorgelagerte Forschung und Zulieferer/Anbieter die Notwendigkeit des Zugangs zu Know-how in der Zellfertigung sowie der FuE und sich hierbei ergebender konkreter Fragestellungen und Bedarfe.

Um nun die Marktentwicklung für Anwendungen und Produkte mit zentraler Bedeutung für LIB besser einschätzen zu können, werden (ebenso wie zuvor die Technologiepfade auf Basis der Erkenntnisse der drei Technologie-Roadmaps für Lithium-Ionen-Batterien, Energiespeicher für die Elektromobilität und Stationäre Energiespeicher) die in den Produkt-Roadmaps für Lithium-Ionen-Batterien sowie Produkt- und Gesamt-Roadmaps Energiespeicher für die Elektromobilität und Stationäre Energiespeicher als zentral für LIB diskutierten Anwendungen betrachtet: Für die Elektromobilität werden neben xEV (HEV, PHEV, BEV) auch 2-Räder und Nutzfahrzeuge betrachtet. Die gesamte Breite von Anwendungen wird in einer nachfolgenden Marktübersicht dargestellt. Für stationäre Anwendungen werden dezentrale PV Batteriesysteme (<10kWh), gewerbliche Speicher für die Eigenbedarfsoptimierung (>100kWh–1 MWh), die Direktvermarktung Erneuerbarer Energien (EE) und die Regelleistung betrachtet. Auch hier wird die gesamte Breite von Anwendungen anschließend in eine Marktübersicht einsortiert

## **2-Räder (Elektrofahrräder bzw. Ebikes)**

Zu unterscheiden sind z. B. Pedelecs, Scooter, E-Motorbikes etc. Diese haben ein unterschiedliches Anforderungsprofil sowie Batteriegrößen. In China werden heute schon 30 Millionen oder mehr Roller und Pedelecs jährlich gekauft (der Bestand weltweit liegt bei über 200 Millionen). Meistens werden in China aber günstige Blei-Säure-Batterien (Pb) verwendet. Mit der Kostensenkung verbreiten sich aber auch LIB mit Anteilen von 15 Prozent in 2015 (rund 4,5 Millionen) bis ggf. auf 30 Prozent in 2030 (rund 15 bis 30 Millionen der dann rund 50 bis 100 Millionen oder mehr Elektrofahrräder)<sup>6,7</sup>.

Unter den heute nur etwa 10 Prozent jenseits Chinas verkauften Elektrofahrrädern (rund 3 Millionen, d. h. in China werden rund 1,5 Millionen Elektrofahrräder mit LIB eingesetzt) ist weiter

zwischen Standard- und Premium-Segment zu differenzieren. Das Premium-Segment betrifft hauptsächlich Mountainbikes und Sportfahrräder mit höherer Lebensdauer, Reichweite und Energiedichte. Hier kommen gegenüber LIB auf z. B. LFP- oder LMO-Basis vielmehr Hochenergie (HE)-NMC- oder NCA-LIB in Frage. Der Automobil-Sektor dient hierbei als Treiber zur Kostensenkung und kann die Attraktivität der HE-LIB für Elektrofahrräder daher in den kommenden Jahren noch steigern.

Mittelfristig werden in Pedelecs/Elektrofahrrädern LIB mit mindestens 6 bis 8 Jahren kalendarischer Lebensdauer eingesetzt. Treiber hierfür sind Kundenanforderungen, da durch die hohen Investitionen ein längerer Produktlebenszyklus besonders im Premium-Bereich gefordert wird. Auch handelt es sich bei Pedelecs um einen Massenmarkt. Bereits 12 Prozent der Neuverkäufe bei Fahrrädern in Deutschland sind Elektrofahrräder.<sup>9</sup> In Deutschland wurden 2014 rund 480 000 Elektrofahrräder (95 Prozent davon Pedelecs) verkauft, mit einer Wachstumsrate von 17 Prozent gegenüber dem Vorjahr (gegenüber China stellt Deutschland somit einen Elektrofahrrad-Markt von rund 1,5 Prozent dar, bezogen auf Elektrofahrräder mit LIB liegt der Weltanteil in Deutschland hingegen bei über 10 Prozent). Dies schließt sich in Fortführung der „Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ an, in welcher Elektrofahrräder in Deutschland um 2012 bereits auf eine Anzahl von 350 000 Stück geschätzt wurden. Pedelecs befinden sich demnach aktuell in der Markthochlaufphase bzw. sogar in der Diffusion und stellen in Deutschland einen wichtigen Markt dar.

Bereits heute liegt der globale Markt für Elektrofahrräder (inkl. E-Motorbikes) mit LIB bei über 5 Millionen pro Jahr. Durch die unterschiedliche Batteriegröße je nach Konzept ergibt sich insgesamt ein Markt für Pedelecs um 2 GWh und für E-Motorbikes (mit geringerem Wachstum) um 10 GWh (bis 2030 ggf. mehrere 10 GWh).

Der Bereich der 2-Räder insgesamt wird sich zukünftig als Follower an den Entwicklungen der im Automotive Bereich verfügbaren HE-LIB orientieren.

### **PKW (HEV)**

Für HEV stellen Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) den Stand der Technik dar. Der Marktanteil der LIB wird von heute rund 10 Prozent bis 2020 vermutlich auf 50 Prozent und bis 2030 auf 90 Prozent oder gar 100 Prozent wachsen (möglicherweise sogar früher). Prinzipiell hat sich unter den LIB aber noch keine führende Zellchemie herausgebildet. Die existierenden Systeme besitzen die favorisierten Zellchemien der jeweiligen Produzenten. Mit der Entwicklung von kostenreduzierten LIB dürfte der Marktanteil der NiMH-Batterie entsprechend sinken.

Da bereits heute eine Sättigung der Verkaufszahlen von HEV (aktuell rund 1,5 bis maximal 2 Millionen HEV) zu beobachten ist, dürften diese jedoch bis 2030 rückläufig sein. Insbesondere auf dem vergleichsweise kleinen europäischen Markt dürften HEV den PHEV und BEV weichen und schließlich verschwinden. Der LIB-Markt für HEV liegt (wegen der Dominanz der NiMH) heute bei rund 0,15 GWh (10 Prozent von 1,5 Millionen mit rund 1 kWh), bei Diffusion der LIB jedoch Sättigung der HEV Verkäufe künftig irgendwo unterhalb des 1 GWh-Bereichs.

Entwicklungen wie Stop and go-Systeme hingegen dürfte es weiterhin separat von Hybrid-Batterien geben, sie stellen jedoch eine Nische (eher jenseits von PKW) dar. Für Busse gibt es solche Möglichkeiten z. B. bereits an den Haltestationen, und so liegt dort der Fokus auf Hochleistungsbatterien, ein hoher/höherer Energieinhalt ist nicht mehr notwendig.

### **PKW (PHEV, BEV)**

PHEV und BEV sind klare Innovationstreiber für die Energiespeichertechnologien auch in anderen Anwendungsfeldern. Heute noch werden sowohl LFP-basierte LIB (in China und von chinesischen Zell-, Modul-, Fahrzeugherstellern mit Verkauf im chinesischen Markt) sowie NCA (insbesondere im Tesla Model S) und NMC-Batterien eingesetzt. Ebenfalls verbaut wird bislang noch LMO (z. B. als engl. „blend“, NMC-LMO oder LMO-NMC), beispielsweise in Verbindung mit einer Graphit-Anode.

Da Automobile für die kommenden Jahre bereits in der Planungsphase und daher die Auslegung für die Zellen jeweils schon aktuell entwickelt sein müssen, wird sich an Zellchemien, welche in Elektrofahrzeugen eingesetzt werden, immer erst mit entsprechendem Verzug etwas ändern.

Künftig wird bei großformatigen LIB (siehe auch „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“) ein Fokus besonders durch europäische OEM auf die HE-NMC-Technologie gelegt, welche z. B. mit einer ebenfalls guten Lade- bzw. C-Rate von mindestens 3 einen guten Ausgangspunkt für das Erreichen höherer Reichweiten und Schnelladefähigkeit darstellt. Langfristig sind aber auch Entwicklungspotenziale der NCA-Technologie im Auge zu behalten.

Mit diesen optimierten LIB dürften zunehmend in Kosten und Reichweite verbesserte Elektrofahrzeuge steigenden Absatz finden, von jeweils rund 200 000 bis 250 000 PHEV und BEV aktuell (der Anteil weltweiter PHEV/BEV-Verkäufe liegt in Deutschland bei rund 5 Prozent) bis rund 1 Million PHEV und BEV um 2020. Langfristig werden PHEV als Übergangstechnologie jedoch vermutlich auch den sich weiter entwickelnden BEV weichen. BEV werden dann mit deutlich höherer Reichweite (und damit

ZEIT →		2015			KURZFRISTIG	
ANWENDUNGEN & PRODUKTE	Anwendung (mobil, stationär)	Referenztechnologie	aktuelle/kurzfristige Alternativtechnologie(n)	LIB-Markt (global)* ~10-30 GWh	Technologien, Wachstum,	
	2-Räder (ebikes, scooter, pedelecs, motorbikes etc.)	2-Rad: Benzin, Mensch e-Rad: Pb, LIB	Pb (CN!), LIB (NMC)	~5 Mio, ~ kWh, ~10 GWh	30-100 Mio Elektro-2-Räder (2015-2030), (ebikes ~0,3-0,6 kWh, scooter ~2-3 kWh)	
	PKW (HEV)	PKW: Benzin/Diesel HEV: NiMH, LIB	NiMH/ LIB (LFP, NCA, NMC)	~1,5 Mio, ~1 kWh, 1-1,5 GWh (NiMH + LIB)	Marktanteil LIB 10-50% (NiMH dominiert), Beginn der Marktsättigung	
	PKW (PHEV)	Innovations- treiber	PKW: Benzin/Diesel PHEV: LIB	LIB (NMC, NCA, LFP)	~200-250 Tsd., ~10 kWh, 2-3 GWh	Breiteres Fahrzeug-Angebot, (für DE/EU PHEV <0,5% bis >1% der Neuzul. Welt
	PKW (BEV)		PKW: Benzin/Diesel BEV: LIB	LIB (NMC, NCA, LFP)	~200-250 Tsd., ~25 kWh, 5-7 GWh	Technische Ausdifferenzierung (Kosten-, BEV <0,5% bis >1% der Neuzul. Welt
	Nutzfahrzeuge (LV, Busse, LKW)	Nutzfahrzeuge: Diesel eFzg.: LIB, BZ	LIB (LFP, NMC, NCA), BZ	~x Tsd., ~50-250 kWh, ~ GWh	Übergang von Demoprojekten, Beschaff., von <<1 bis ~1% der Neuzul. Welt	
	Dezentrale PV Batterie-Systeme	LIB (50-70%), Pb (50-30%)	LIB (LFP/LTO, kostenopt.)	~10-100 Tsd., <10 kWh, ~0,1-0,5 GWh	Markthochlauf und -diff.: LIB wird wirt- Grid parity bei PV mit Energiespeicher,	
	Multi-Purpose Eigenbed.opt. und Peak Shaving	LIB (~70%), Pb (~30%)	LIB (LFP/LTO, kostenopt.)	begrenzte Stückzahlen 0,1-x GWh	Markteinführung: Markthochlauf:	
	Direktvermarktung erneuerbarer Energien	PV: LIB, Wind: (HT)	Adiabat. Druckluftspeicher LIB (LFP/LTO, kostenopt.)	PV-Windparks	Markthochlauf und adiabat. Druckl ggf.	
	Regelleistung	Rot. Massen (<sec), Prozessst. (s), Pumpsp. (m)	Superc. (<s), Schwungrad (s), Li-cap (<s), LIB (<s,s,m)	einzelne LIB	Markthochlauf mit State of Art und	

größeren Batterien bis z. B. durchschnittlich 60 kWh, im PKW-Bereich insgesamt jedoch nicht über 100 kWh), Schnelladefähigkeit und zu Kosten, welche sich denen von herkömmlichen Automobilen mit Verbrennungsmotor weiter annähern, verfügbar werden. Der Markt für LIB durch BEV (PKW) ist der mit Abstand wichtigste Markt, sollte sich die Elektromobilität entsprechend durchsetzen. Entsprechend ist es bis 2030 (und später) ratsam, grundsätzlich in Szenarien zu rechnen, da neben der Entwicklung der Verkaufszahlen (Neuzulassungen) auch die Entwicklung der verbauten Batteriegrößen zu berücksichtigen sind (in der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ als kosten- und reichweiteoptimierte Szenarien dargestellt). Die Terawattstunden (TWh)-Grenze (LIB-Zellnachfrage) könnte um 2030 für BEV im optimistischen Szenario erreicht werden.

### Nutzfahrzeuge (LV, Busse, LKW)

Unter den rund 90 Millionen in 2014 weltweit produzierten Fahrzeugen (davon rund 67,5 Mio. Millionen PKW) lag die Produktion von Nutzfahrzeugen bei über 22 Millionen (darunter rund 18 Millionen leichte Nutzfahrzeuge (LV), rund 3,8 Millionen LKW und über 0,3 Millionen Busse).<sup>9</sup> Auch wenn der Anteil

der Neuzulassungen batterieelektrischer Nutzfahrzeuge im Vergleich zu PKW heute und vermutlich auch zukünftig geringer ausfallen wird, so ist dennoch eine ähnliche Dynamik und damit die Erschließung eines ebenso attraktiven Wachstumsmarkts für LIB wie im PKW-Bereich zu erwarten.

Die Spannweite der in Nutzfahrzeugen verbauten Batterien kann hier zwischen 50 kWh bis 250 kWh (oder größer) liegen, wodurch ein dreimal so kleiner Markt (vgl. PKW) durch zwei- bis dreimal so große eingesetzte LIB-Kapazitäten ähnlich groß sein könnte.

Auch hier wird sich die Entwicklung als Follower an der Batterie- und PHEV/BEV-Entwicklung im PKW-Bereich orientieren. Jedoch ist die Situation komplexer: LIB eignen sich für den mobilen Einsatz auch langfristig nur bis zu einer begrenzten Gewichtsklasse für eine Traktion.

So sind sie heute auch in der Luftfahrt beispielsweise nur in leichten Flugzeugen/Fliegern und z. B. keinesfalls in Passagierflugzeugen für den Antrieb denkbar und bleiben dort auch in Zukunft noch eine Vision.

MITTELFRISTIG	2020	LANGFRISTIG	2030	>2030
Diffusionsgrad	LIB-Markt (global)* ~50-100 GWh	Technologien, Wachstum, Diffusionsgrad	LIB-Markt (global)* ~0,3-1 TWh	Diffusionsgrad, Trend
LIB Penetration 15-30 % (emotorbikes ~8-15 kWh)	~10 Mio, ~ kWh, >10 GWh	zunehmende Verbreitung	~x*10 Mio, ~ kWh, ~x*10 GWh	Diffusion
~2 % HEV an Neuzul. Welt (für DE/EU kaum relevanter Markt)	~1 Mio, je ~1 kWh, ~1 GWh (NiMH + LIB)	Marktanteil LIB 50-90 % Sättigung bzw. Rückgang HEV (~1 % d. Neuzul.)	<1 Mio, je ~1 kWh, <GWh LIB Markt	~100 % LIB HEV verschw.
relevanter Übergangsmarkt) (EU ~1/3, DE ~5 %)	~0,5-1,5 Mio, je ~10 kWh, 5-15 GWh	Diffusion (mit HE-LIB) und Beginn der Sättigung PHEV ~1-5 % der Neuzul. Welt	~1,5 Mio, je ~10 kWh, <100 GWh	Sättigung, Rückgang
Reichw.optimiert), Zukunftsmarkt! (EU ~1/3, DE ~5 %)	~0,5-1,5 Mio, 25-40 kWh, 20-60 GWh	Technologiereifung (HE-LIB), Diffusionsbeginn BEV ~1-10 % der Neuzul. Welt	~5-10 Mio, 25-60 kWh, 0,1-1 TWh	Diffusion (globaler Wandel)
Flotten zu breiterem Einsatz	~x*10 Tsd., ~50-250 kWh, ~x GWh	~1-5 % der Neuzul. Welt mit Elektro-Nutzfahrzeugen BSZ tendenziell Nische (Busse, LKW)	~1 Mio?, ~50-250 kWh, ~100 GWh	Diffusion (folgt BEV)
schaftlicher (LIB dominiert Pb) DE: ~40 Tsd. Niveau ab 2016	~100 Tsd., <10 kWh, ~ GWh	Diffusion: Kostenvorteil opt. LIB, HE-LIB aus xEV Neubewertung: RFB, NaS (NT)?	~1 Mio, <10 kWh, ~10 GWh	Diffusion
>5 MW (LIB) 0,1-1 MW (LIB)	begrenzte Stückzahlen 0,1-x GWh	Diffusion: Kostenvorteil opt. LIB, HE-LIB aus xEV Neubewertung: RFB, NaS (NT)?	Tausende? * MWh = x GWh Level?	begrenzte Stückzahlen
Beginn der Diffusion, zeitnahe Game changer?	Kompetitiv für LIB aber wachsender Markt	Diffusion: Kostenvorteil ad. Druckl., opt. LIB, RFB Neubewertung: NaS (NT), H <sub>2</sub> aus übers. Energie?	LIB Markt ~ x GWh Level?	Diffusion
ggf. alternative Technologien	LIB?	Diffusion, LIB als Alternative ggf. zu spät wirtsch.	LIB Marktanteil aber ggf. sehr klein	Marktsättigung

Angaben/Märkte (Stückzahlen, Batteriegröße, Zellnachfrage)  
bezogen auf LIB und Welt sofern nicht DE explizit benannt

Mobile Anwendungsfälle	Stationäre Anwendungsfälle	Stand der Technik Referenztechnologie	Zeitnahe (5 Jahre) Alternativ- technologien
---------------------------	-------------------------------	------------------------------------------	---------------------------------------------------

Für den Einsatz in leichten Nutzfahrzeugen (<100 kWh) sind LIB daher durchaus eine gute bzw. die beste Option. So werden sie bereits vielfältig in Fahrzeugflotten (Post, Lieferdienste etc.) eingesetzt und dürften ähnlich wie bei PKW weitere Verbreitung finden.

Für Busse und LKW jedoch stellen selbst große Batterien keine Lösung mehr dar, um hohe Reichweiten zu erreichen. Während der Verbrauch bei BEV (PKW) bei 5–8 km/kWh liegt, bei FCEV bei rund 4 km/kWh System (vgl. „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“) werden mit Bussen und LKW nur noch rund 1 km/kWh<sup>10</sup> (ggf. etwas mehr) erreicht. Somit sind selbst die derzeit größten Anwendungen mit rund 250 kWh in der Reichweite auf unter 300 km begrenzt.

Jedoch kann dies für viele Anwendungsbereiche ausreichend sein, z. B. Stadtbusse, regionale LKW-Fahrten etc. In dem Kontext kurzer und definierter Fahrten (beispielsweise Bus-/Bahnhöfen) sind neben Batterien dann z. B. auch Supercaps eine Option für den Stop-and-go-Verkehr. Für Fahrten, welche über einen Umkreis von 100 Kilometer hinausgehen sowie den Fernverkehr insgesamt sind batterieelektrische LKW und Busse jedoch keine Option mehr.

Im Anwendungsfeld der Busse und LKW (insbesondere Fernverkehr) ist und bleibt der Stand der Technik daher vermutlich auch noch langfristig der Dieselmotor. Dennoch können hier gerade Brennstoffzellenfahrzeuge einen Markt finden (als Primärtrieb, Range-extended fuel cell (REFC) oder auch APU). Aber auch Oberleitungs-LKW<sup>11</sup> stehen zur Diskussion, um das Reichweiten-Problem zumindest teilweise zu lösen und den LKW Güterverkehr umweltfreundlicher zu machen.

Für die Nachfrage nach LIB-Zellen ist festzustellen, dass Batterien in reinen batterieelektrischen Nutzfahrzeugen ebenso wie in Brennstoffzellenfahrzeugen, Brennstoffzellen-Range-extendern, Oberleitungs-Fahrzeugen etc. verwendet werden und damit in jedem Fall ein attraktiver Zukunftsmarkt gesehen werden kann.

Auf Basis der Anzahl von Nutzfahrzeugen, typischer Batteriegrößen in den jeweiligen Größenklassen der Nutzfahrzeuge und einer zwar geringeren, aber den BEV folgenden Diffusion könnten LIB in Nutzfahrzeugen bis 2030 einen rund 100 GWh großen Markt ausmachen.

## Kleinspeicher (Dezentrale PV Batterie Systeme)

Dezentrale PV-Batterie-Systeme (<10 kWh) stellen im privaten Bereich eine erste bereits existierende und attraktive Anwendung für LIB dar.

Die Pb und LIB auf Basis von LFP/Graphit (bzw. das Stromnetz) stellen den Stand der Technik dar. Zukünftig könnten LFP/LTO eingesetzt werden. Die Vorteile von LFP und LTO liegen darin, dass es sich einerseits um kostengünstige LIB-Zellchemien handelt, und sie andererseits über eine lange Lebensdauer verfügen. Die Schlüsselparameter sind für diese stationären Speicher Sicherheit, Lebensdauer und Kosten. Die volumetrische oder gravimetrische Energiedichte spielt zunächst eine untergeordnete Rolle, weshalb xEV-Zellen erst mit zunehmender Kostenreduktion im stationären Energiespeichermarkt attraktiver werden.

Bereits heute ist die LIB wirtschaftlich und die sogenannte Netzparität (engl. „grid parity“) bei PV mit Energiespeichern ist erreicht. Dabei sollten die Energiespeicher mit 20 Jahren in etwa so lange halten wie die PV-Anlagen. Für PV-Anlagen, für welche das EEG ausläuft, wird es zudem sinnvoll sein, einen Energiespeicher zu kaufen, was ab dem Jahr 2020 zu einem weiteren Anstieg des Marktes und Diffusion führen dürfte. Bei dieser Entwicklung spielt sowohl die Verärgerung der Kunden über die Preispolitik der Netzbetreiber als auch ihr Autonomiegedanke eine große Rolle. Ebenfalls relevant sind Nachhaltigkeitsmotive. Allerdings würde dieses Modell zusammenbrechen, sobald es sich um ein Massenphänomen handelt, da das Verteilnetz sehr teuer ist und ein Fixbetrag für die Stromleitung zu zahlen ist. Die Entwicklung könnte aber zu neuen Geschäftsmodellen führen, wobei z. B. die Energieversorger als Versicherer auftreten, welche die Stromleitung bauen und bezahlt bekommen. Die Selbstversorgung ist demnach jedoch kein beliebig großes Geschäftsmodell.

Auf Basis der in Deutschland (vgl. „Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“) rund 10000 PV-Batterien (darunter rund 70 Prozent LIB mit 5–10 kWh) dürfte der Markt in Deutschland auf dem Niveau von rund 50 MWh liegen. Aber auch weltweit (vgl. z. B. mit Marktstudien von avicenne Energy)<sup>12</sup> wird der Markt aktuell auf nicht mehr als 0,5 GWh eingeschätzt. Zwischen 2020 und 2030 könnte dieser auf 1–10 GWh ansteigen. Solide Markteinschätzungen gibt es hierzu jedoch noch nicht, zumal der Markt sehr stark durch Entscheidungen von Einzelkunden abhängt. Weiterhin wird in Marktstudien oder existierenden Datenbanken<sup>13</sup> nach netzgebundenen/On-Grid- und Off-Grid Anwendungen differenziert. Beides wäre hier im Bereich der PV-Batterien gemeint.

## Gewerbliche Energiespeicher

LIB (LFP/Graphit, zukünftig LFP/LTO, längerfristig LIB-xEV-Zellen) und Pb stellen auch für größere gewerbliche Energiespeicher (>100 kWh) die Referenztechnologie dar, jedoch zukünftig eventuell mit Erweiterung durch Natrium-Schwefel (NaS)- (heute z. B. schon in Japan) und Redox-Flow-Batterien (RFB). Im gewerblichen Bereich ergeben sich andere Nutzungs- und Anwendungsmöglichkeiten, so dass ein Multi purpose-Design (Auslegung z. B. zur Eigenbedarfsoptimierung und Peak Shaving) interessant werden kann.

Auch wenn bei großen LIB-Zellen eine starke Kostendegression durch Fahrzeugzellen und damit wachsende Attraktivität auch für den stationären Bereich erwartet werden, bedeutet das nicht, dass bei RFB mit gleichen Anstrengungen nicht ähnliche Verbesserungen erzielt werden könnten.

Der Charme der RFB liegt hauptsächlich in der Entkoppelung von Leistung und Energie. Die Batterie ist daher nicht starr, sondern kann individuell an die geforderte Leistung bzw. Energie angepasst werden. Auch die chemische Zyklenstabilität ist ein Vorteil. Außerdem ist die Energiedichte zwar vergleichsweise gering, aber sehr gut skalierbar. Ein weiterer Vorteil ist die gute Wartbarkeit.

Erste Prototypen der RFB existieren bereits seit Jahren. Des Weiteren hat es viele Projekte gegeben, in denen Energie und Leistung hochskaliert wurden. Trotzdem hat sich im MW-Bereich die RFB noch nicht wirklich durchgesetzt, da die Kosten teilweise doch zu hoch lagen. Es ist fraglich, ob sie sich bis 2020 durchsetzen kann, weshalb sie (ebenso wie eine NaS-Niedrig-Temperatur-Batterie oder zukünftig andere Konzepte, z. B. auch ZnBr-RFB) langfristig neu zu bewerten wäre. Dies müsste stark anwendungsabhängig erfolgen und die Lebenszyklus-Kosten bzw. die Kosten pro kWh Durchsatz einbeziehen (auch die Kopplung mehrerer Anwendungsfälle, also dem Multi purpose-Design wäre zu bewerten). Langfristig müsste die RFB ebenso wie die Pb und NaS mit der Kostenentwicklung der LIB mithalten.

Die obigen Argumente gelten noch viel mehr, wenn sich eines der Systeme im Bereich von <10 kWh halten bzw. durchsetzen will. Dieser Markt wird für LIB zwar als begrenzt gesehen, jedoch handelt es sich um große Kapazitäten (0,1–5 MWh und mehr). Der Markt könnte heute im MWh-Bereich liegen und sich bis 2030 evtl. auf ein >GWh-Niveau entwickeln. Aber auch dies hängt von Entscheidern im gewerblichen Bereich ab und lässt sich heute noch nicht differenzierter abschätzen.

## Direktvermarktung Erneuerbarer Energien

Es wird zwischen EE-Erzeugung mit PV- (LIB ist Referenztechnologie) und Windkraftanlagen (NaS ist Referenztechnologie) unterschieden. Für die mit über 1 MW ausgelegten Anlagen sind LIB im Minuten- bis Viertelstunden-Bereich für PV und NaS, ZEBRA, RFB im Stunden- bis Tage-Bereich in Windkraftanlagen geeignet. Mittel- bis langfristig können auch Wasserstoffspeicher für Kraftwerke mit mehreren MW an Bedeutung gewinnen.

Adiabatische Druckluftspeicher könnten kurzfristig hinsichtlich der Investitionen und mittelfristig unter Betrachtung der Kosten pro ausgespeicherter kWh attraktiv werden und einen engl. „Game changer“ darstellen, also das Potenzial besitzen, andere Technologien zu verdrängen.

LIB könnten schon kurzfristig wirtschaftlich für diese Anwendung werden, befinden sich aber im Kontext der Windkraftanlagen in einem kompetitiven Umfeld. Der Markt im PV-Bereich wächst jedoch zugleich mit dem Ausbau der Anlagen und der Kostendegression der LIB.

## Regelleistung

Als Stand der Technik gelten rotierende Massen, Prozesssteuerung, Pumpspeicher. Auch Supercaps, Li-Caps, und Schwungräder dürften auf der extremen Leistungsseite (High power-Anwendungen) Verwendung finden. RFB und NaS beispielsweise sind hingegen keine Hochleistungstechnologien. Für diesen Anwendungsfall wäre eine extreme Überinstallation nötig, um eine entsprechende Leistung zu bekommen. Sie sind daher gegenüber dem Stand der Technik im Nachteil.

Für Energiespeicher wie LIB sind erste Ansätze in der Diskussion, Leistung im Millisekunden-Bereich aufzunehmen oder abzugeben. Heute sind zur Stabilisierung der Netze schon einige 100 MWh weltweit installiert, diese Entwicklung wird weiterhin voranschreiten. Jedoch wird dieser Markt insgesamt begrenzt sein und langfristig eine Marktsättigung erwartet.

## Marktentwicklung für LIB

Mit den vier betrachteten Anwendungsbeispielen für LIB im stationären Bereich ergeben sich vermutlich ähnliche Märkte im Bereich kleiner Speicher (<10 kWh) durch die großen verkauften Stückzahlen wie im Bereich großer Speicher (>10 kWh bzw. jenseits 0,1–1 MWh) durch die Größe der Speicher (dabei aber begrenzte Zubauten).

Weiterhin ergeben sich für LIB aber auch stationäre Märkte jenseits der netzgebundenen Anwendungen, in welchen heute beispielsweise auch Pb schon breiten Einsatz finden (z. B. USV), sowie als kleine bis große Speicher für Inselanlagen jenseits der Stromnetze.

Für die betrachteten Beispiele ergeben sich bereits jährliche Marktpotenziale für LIB-Zellen von derzeit über 20 GWh im Bereich der Elektromobilität sowie vermutlich rund 1–2 GWh im Bereich der stationären Anwendungen. Eine genauere Einschätzung wäre nur durch eine breite Befragung aller Zellhersteller und Anwendern von LIB-Systemen machbar und jenseits der Durchführbarkeit in heutigen Marktstudien. Allerdings ergeben sich aus heute existierenden LIB-Produktionskapazitäten Obergrenzen, in welche Prognosen und Angaben aus Marktstudien und Datenbanken einsortiert werden können. Demnach dürften in 2015 nach Angaben diverser Marktanalysten sowie der bekannten weltweiten Zellfabriken zwischen 55 und 70 GWh LIB-Zellen produziert worden sein, wovon 40 GWh kleinformatige Zellen für die mobile Elektronik (Konsumanwendungen, Power Tools etc.) hergestellt wurden. Die für Elektromobilität und stationäre Anwendungen ermittelten bzw. abgeschätzten Zahlen liegen in dem Bereich der 15 bis 30 weiteren GWh.

Davon ausgehend können LIB-Märkte zukünftig durch die

- Substitution bestehender und bereits gut einschätzbarer Märkte (z. B. Diffusion in Anwendungen, in welchen heute Pb oder sonstige Energiespeicher eingesetzt werden),
- Erschließung neuer Märkte (wie der Elektromobilität und vieler stationären Anwendungen) sowie das
- Wachstum dieser Märkte selbst entstehen.

Wie sich die Märkte für LIB in den Bereichen mobiler Elektronik (im Wesentlichen Konsumelektronik aber auch weitere tragbare Anwendungen, welche i. d. R. eine Batteriegröße bis zu 1 kWh haben), Elektromobilität (alle Batterien zur Traktion, dies kann z. B. bei Elektrorädern auch unterhalb 1 kWh beginnen und bis in den Bereich mehrerer 100 kWh reichen) und stationärer Anwendungen (von Speichern <10 kWh bis >MWh) in den kommenden Jahren entwickeln dürften, wird daher im Folgenden in einer vertieften Marktanalyse sowie über den Vergleich mehrerer Marktstudien (sogenannte Meta-Marktanalyse) diskutiert. Für langfristige Entwicklungstrends werden Szenarien (konservativ, optimistisch und Trend) betrachtet.

# BATTERIEMÄRKTE – PROGNOSEN UND LANGFRISTSZENARIOEN

## LIB-MÄRKTE (NACH KAPAZITÄT)

Jeder der LIB-Teilmärkte bzw. jede Anwendung ist durch verkaufte Stückzahlen des Produkts sowie die für die Anwendung typische Batteriegröße des darin eingesetzten Energiespeichers (in kWh) gekennzeichnet.

Trägt man daher Stückzahlen und Batteriegröße doppel-logarithmisch gegeneinander auf (siehe Abbildung), so stellen die diagonal verlaufenden Linien das Produkt aus Anzahl und Batteriegröße und daher den Markt einer jeweiligen Anwendung dar (hier eingezeichnet: 1, 10, 100 und 1000 GWh-Linien). Für die in heutigen Marktstudien, Datenbanken und sonstigen Quellen dokumentierten Märkte von LIB in den jeweiligen Anwendungen wurden für 2015 sowie unter Einbezug der Wachstumsraten für 2025 die prognostizierten Verkaufszahlen (also nur die verkauften Produkte mit LIB, nicht zwingend die Gesamtverkäufe eines Produkts, falls z. B. auch andere Batterietypen alternativ eingesetzt werden) sowie durchschnittlich zu erwartenden Batteriegrößen ermittelt und eingetragen.

Das Gesamtbild zeigt eine große Anzahl von Produkten mit LIB im Bereich kleiner 100Wh, welche in Stückzahlen von 10 Millionen bis einige Milliarden pro Jahr verkauft werden. Hierzu zählen besonders Handys (100 Prozent LIB-Einsatz), Tablets (100 Prozent LIB-Einsatz), Laptops (100 Prozent LIB-Einsatz), welche bereits heute 10 GWh-Märkte ausmachen. Diese entwickeln sich für Tablets und Handys weiterhin dynamisch.

Weitere Produkte in dem hier als „mobile Elektronik“ zusammengefassten Bereich für kleinformatige Batterien mit Märkten bis in den GWh-Bereich sind: Power Tools (50 bis 70 Prozent LIB-Einsatz, daneben auch NiCd, jedoch weitere Tendenz zu LIB) sowie schnurlose Telefone (15 bis 35 Prozent LIB-Einsatz, daneben NiMH), Camcorder und Videospiele (100 Prozent LIB-Einsatz), Digitalkameras und MP3-Player (90 bis 100 Prozent LIB-Einsatz, daneben Primärbatterien), Spiele mit Elektronik (40 bis 60 Prozent LIB, ansonsten NiMH und Primärbatterien) sowie Haushaltsgeräte, aber auch medizintechnische Geräte.

Der Bereich der Konsumelektronikbatterien bzw. der hier noch breiter gefassten „mobilen Elektronik“ weist bereits seit längerem Wachstumsraten um die 8 bis 10 Prozent auf, was auch mit sich dynamisch fortentwickelnden „smarten“ Produkten zusammenhängt. In Zukunft sollten daher z. B. auch Entwicklungen, welche unter dem Stichwort engl. „Energy Harvesting“ sowie sogenannte „wearables“ (d. h. smarte Funktionskleidung) verstanden werden, berücksichtigt werden. Auch hier könnten sich zukünftige Marktpotenziale für LIB ergeben und die Nachfrage nach LIB für „mobile Elektronik“ weiter dynamisch anwachsen. Die Anwendungsbereiche für elektromobile und stationäre Energiespeicher durchmischen sich, wobei die netzgebundenen Energiespeicher mit LIB (>10 kWh) bei Stückzahlen von 100 bis 1000 im MWh-Bereich sowie die über 4 Millionen Elektrofahrräder mit 300–600 Wh LIB Größe jeweilige Grenzen bzgl. Stückzahlen und Batteriegröße setzen.

Das Beispiel der Elektrofahrräder (inkl. Pedececs, Scooter) zeigt beispielsweise, dass neben dem Wachstum der Verkaufszahlen an sich auch eine Diffusion der LIB gegenüber der in China dominierenden Pb in dieser Anwendung zu dynamischen Wachstumsmärkten führt (gezeigt sind ja nur die LIB-basierten Elektrofahrrad-Verkäufe). Auch in Gabelstaplern, Marineanwendungen (z. B. Boote, U-Boote) sowie stationären Märkten für Telekom, USV und zum Teil Energiespeichern (<10 kWh) beispielsweise in PV-Hausbatteriesystemen dominieren oder koexistieren heute noch Pb neben LIB. Hier ergeben sich für LIB auch ohne ein Wachstum der Produktverkäufe interessante Märkte durch eine Substitution der Pb in diesen Anwendungen.

Die mit Abstand interessantesten Wachstumsmärkte für LIB-Zellen stellen BEV und PHEV (weniger HEV) im PKW-Markt sowie leichte und schwere Nutzfahrzeuge (z. B. LKW, Busse) dar. Selbst bei schweren Nutzfahrzeugen mit Brennstoffzellentechnologie oder z. B. Oberleitungs-LKW würden immer auch LIB unterstützend eingesetzt werden, weshalb sich hier in jedem Fall ein relevanter Markt ergeben dürfte. Deutlich klarer bzw. eindeutiger abschätzbar ist hier jedoch sicherlich der Bereich von Fahrzeugen mit 10–100 kWh Batteriegröße, in welchen LIB als Energiespeicher zur Traktion die besten Vorteile mit sich bringen.



Gegenüber einem Markt von rund 10 GWh in 2015 wird für 2025 ein Markt von 100 bis ggf. 300 GWh für BEV und PHEV erwartet. Die TWh-Grenze jährlicher Nachfrage nach LIB-Zellen könnte eventuell bis 2030 erreicht sein.

Eine Darstellung der jährlichen Nachfrage nach LIB-Zellen gegenüber dem mittleren jährlichen Wachstum für alle Anwendungen ermöglicht eine Art Portfolioanalyse. Sie zeigt wieder für 2015 sowie prognostiziert für 2025 (in logarithmischer Auftragung) die Zellenachfrage in GWh, wobei die Anwendungen mit der größten Nachfrage in 2015 bei rund 10 GWh liegen und die Wachstumsraten bis über 40 Prozent reichen.

Bis 2025 können sich demnach BEV und PHEV sowie Elektro-Nutzfahrzeuge (ggf. auch der Gesamtmarkt für stationäre Energiespeicher) zu den größten und weiterhin dynamischsten Märkten entwickeln (sog. Stars), während die Entwicklung von LIB in weiteren elektromobilen (LIB zur Traktion) und stationären Märkten mit noch geringerer Nachfrage oder Diffusion aber hoher Dynamik die Marktpotenzialeinschätzung noch schwieriger gestaltet (sog. Question Marks).

Die Anwendungen der mobilen Elektronik (wie Tablets, Handys, Laptops) aber auch die heute bereits etablierten Elektro-2-Räder (bzw. darunter E-Motorbikes etc.) lassen sich mit geringerem, dafür aber solidem Wachstum als große und eher zuverlässige Märkte (sog. Cash Cows) einstufen. Gerade ein Reihe Konsumelektronikanwendungen wie Camcorder, Digitalkameras etc. zählen sicherlich zu den stagnierenden Märkten (sog. Poor Dogs).

Somit stellen die in den vertiefenden Roadmaps zu stationären Energiespeichern und Energiespeichern für die Elektromobilität ausgewählten Anwendungen tatsächlich die zentralen Zukunftsmärkte aus Perspektive der Lithium-Ionen-Batterie dar.

## LIB-MÄRKTE (NACH UMSATZ)<sup>15</sup>

Insgesamt ergibt sich aus den zahlreichen Einzelanwendungen für LIB im Bereich der „mobilen Elektronik“ (rund 40 GWh in 2015), Elektromobilität (von 2-Rädern bis PKW, Nutzfahrzeuge, etc. rund 15–25 GWh in 2015) und stationären Anwendungen (rund 1–2 oder mehr GWh in 2015) ein LIB-Markt von rund 55–70 GWh in 2015.

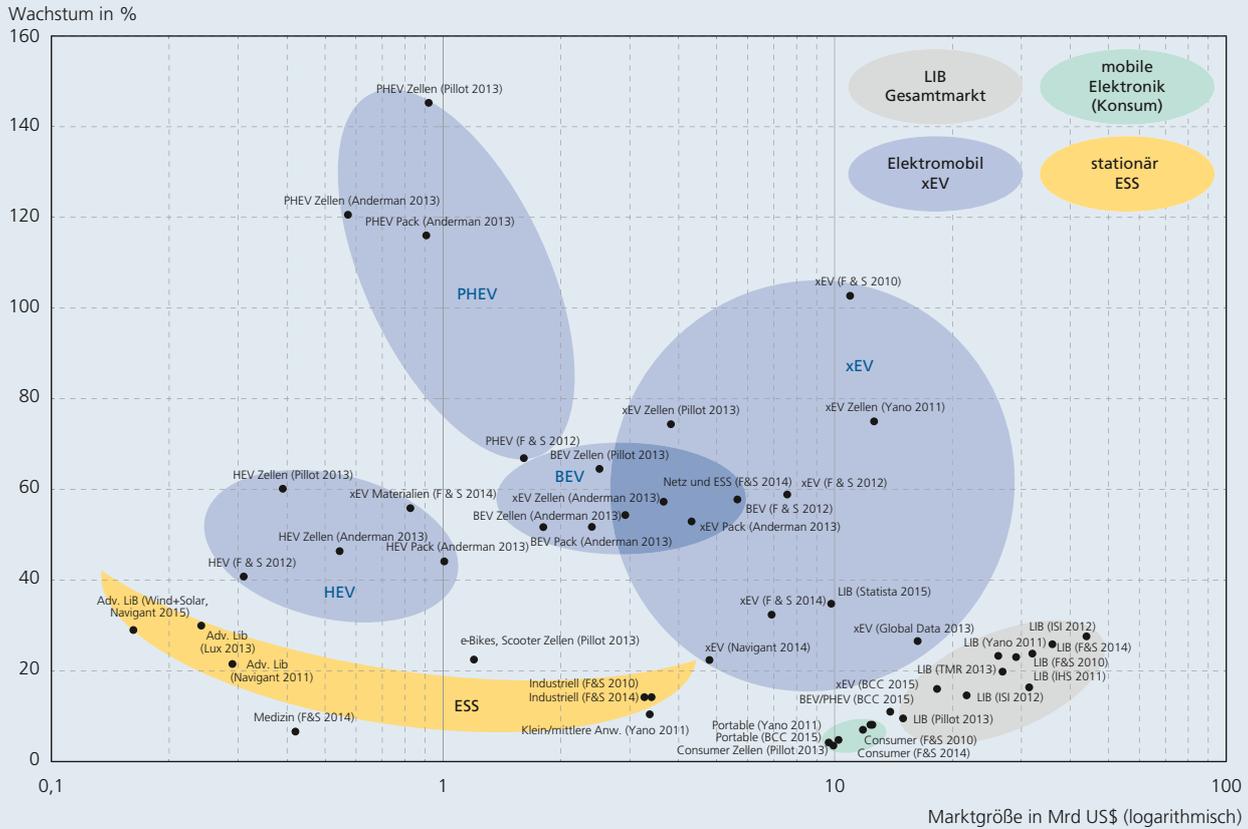
Bezieht man die Zellpreise von LIB sowie deren Entwicklung in der Vergangenheit sowie eine Prognose bis 2020 mit ein, lassen sich für diese Anwendungen die potenziellen Märkte nach Umsatz ermitteln. Eine große Anzahl verfügbarer Marktstudien ist in den Abbildungen auf Seite 21 nach Marktgröße (in Mrd US\$, logarithmisch) sowie Wachstum (jährliches durchschnittliches Wachstum zwischen 2015 und 2020 in Prozent) verortet. Hierzu wurden Marktgrößen und Wachstum (sofern nicht für 2015 und 2020 verfügbar) auf diese beiden Zeitpunkte umgerechnet.

Es zeigt sich zunächst, dass für den LIB-Gesamtmarkt die Marktgröße (15–45 Mrd US\$) und das Wachstum (10 bis 30 Prozent) insgesamt eine durchaus große Spannbreite ergeben, wobei neben der Abschätzung der Zellenachfrage in GWh die zusätzlichen Preisannahmen (in US\$/kWh) hier je nach Marktstudie sehr unterschiedlich sein können und eine zusätzliche Unsicherheit ergeben. Auch ist aus den Marktstudien nicht immer direkt ersichtlich, ob ein Markt für LIB Zellen, Packs, Systeme etc. angenommen ist usw. Dennoch ergibt sich unter Annahme des 55–70 GWh-LIB-Marktes in 2015 in Kombination eine Preisspanne von 200–800 US\$/kWh. Dies ist durchaus der Bereich, in welchem Preise für klein- und großformatige LIB-Zellen bis -Systeme liegen und somit konsistent zu den bisherigen Recherchen.

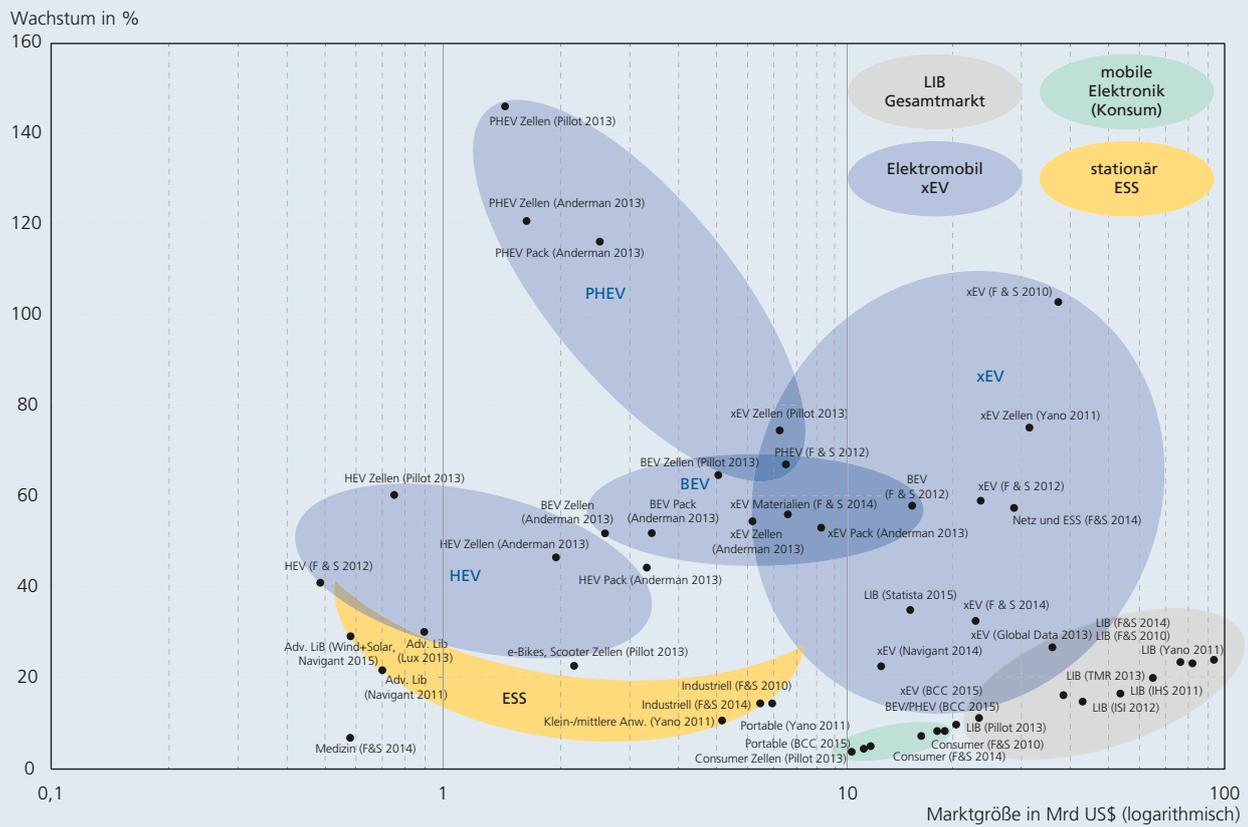
Für den Bereich der mobilen Elektronik bzw. Konsumelektronikanwendungen ergibt sich ein Markt von 10–15 Mrd US\$ und Wachstumsraten um 5 bis 10 Prozent. Umgerechnet aus dem (maximal) 40 GWh-Gesamtmarkt für mobile Elektronik ergeben sich LIB-Preise von 200–400 US\$/kWh. Auch hier sind die niedrigeren Preise für kleinformatige LIB-Zellen und Systeme plausibel.

Große Unterschiede ergeben sich in der Einschätzung der Märkte für LIB in der Elektromobilität. Für Batterien in PHEV wird kurzfristig ein größter Wachstumsmarkt gesehen (70 bis über 100 Prozent), für BEV wird die Marktgröße (durch die größere Batteriekapazität im Vergleich zu einer PHEV-Batterie) attraktiver, das Wachstum jedoch mit 50 bis 70 Prozent im Vergleich zu PHEV geringer eingestuft. Für HEV liegen Marktgröße und Wachstum entsprechend nochmals geringer. Dies passt zunächst in das Gesamtbild, dass PHEV eine mittelfristig attraktive Übergangstechnologie darstellen und BEV dennoch mit Bezug auf die Zellenachfrage den deutlich größeren Markt darstellen. Für die drei

## LIB-Märkte in 2015 nach Segmenten<sup>15</sup>



## LIB-Märkte in 2020 nach Segmenten<sup>15</sup>



xEV-Fahrzeugkonzepte insgesamt ergibt sich ein abgeschätzter Markt von 4 bis etwa 15 Mrd US\$ (mit einem Wachstum von 20 bis 100 Prozent). Bei einer Zellenachfrage von rund 10 GWh für BEV, PHEV und HEV in 2015 ergibt sich eine Spanne für die angenommenen Batteriekosten zwischen 400 bis 1500 US\$/kWh. Tatsächlich variieren die Kosten für LIB (Module, Packs, Systeme) in HEV mit 800–1500 USD/kWh<sup>16</sup>, PHEV mit 400–1000 US\$/kWh und BEV mit 300–600 US\$/kWh bereits untereinander, so dass die ermittelte Preisspanne auch hier plausibel ist.

Die aus den Marktstudien für 2015 abgeschätzten Märkte für xEV liegen trotz aller Unsicherheiten im Wachstum damit bereits in 2015 im Bereich des Konsumerzellmarktes. Auch dies ist plausibel, da die noch höheren Kosten der LIB im xEV-Bereich sich mit der noch höheren Zellenachfrage im Konsumelektronikbereich etwa ausgleichen. Bis 2020 oder spätestens 2025 ist daher ziemlich sicher von einem größeren Markt durch Fahrzeugbatterien im Vergleich zu Batterien für Konsumeranwendungen auszugehen. Die Wachstumsraten dürften sich aber ebenso sicher auf einem deutlich geringeren Niveau zwischen ggf. 20-30 Prozent einpendeln (siehe „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“). Auch fallen die Batteriepreise weiter.

Für stationäre Anwendungen ergeben sich Marktabschätzungen von 150–300 Mio bis über 3 Mrd. US\$ und Wachstumsraten von rund 10 bis 30 Prozent. Dabei ist zu unterscheiden, dass sich die unteren Markteinschätzungen nur auf den Markt der Integration der Erneuerbaren Energien und daher eng auf netzgekoppelte stationäre Speicher beziehen.<sup>17</sup> Die oberen Markteinschätzungen sind dabei sicherlich breiter und auf alle Arten stationärer und industrieller Anwendungen zu beziehen. Auch hier ergibt sich im Abgleich mit den vermutlich rund 1–2 oder mehr GWh Nachfrage nach LIB-Zellen in 2015 ein Preis von 150 bis über 1500 US\$/kWh. Wieder zeigt sich, dass neben der großen Unsicherheit der Markteinschätzung an sich auch eine unterschiedliche Abgrenzung (Zelle, System etc.) sowie unterschiedliche Annahmen über die Preisentwicklung (diese hat sich zwischen 2010 und 2015 sehr dynamisch entwickelt) der jeweiligen Marktstudien festzustellen ist. Dennoch ist auch für den Markt von LIB in stationären Anwendungen als Ergebnis festzustellen, dass es sich hier um einen heute noch schwer einschätzbaren Zukunftsmarkt handelt und (wie die Wachstumsraten zeigen) mit einer eher langfristigen Marktentwicklung auf zunächst überschaubarem Niveau zu rechnen ist.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass es angesichts der sehr schwierig einzuschätzenden Preisentwicklung von LIB-Zellen bzw. Systemen leichter und verlässlicher ist, bei der Marktentwicklung in Batteriekapazität (GWh) zu rechnen. Auch lassen sich dadurch unterschiedliche Energiespeicher bzw. Batteriesysteme (wie insbesondere LIB und Pb) besser in Kontext setzen.

## BATTERIEMÄRKTE BIS 2025 (GLOBAL)

Lithium-Ionen-Batterien weisen somit als Energiespeicher neben etablierten Anwendungen in der „mobilen Elektronik“ mit durchschnittlich 8 bis 9 Prozent Wachstum die größten Wachstumspotenziale bei der Erschließung neuer Märkte in der Elektromobilität auf mit aktuellen Wachstumsmärkten jenseits der 20 Prozent. Aber auch in neuen (z.B. Energiespeicher zur Integration EE) ebenso wie etablierten stationären Anwendungen (z. B. USV), in welchen teilweise alternative Energiespeicher wie Pb dominieren, ergeben sich mit zunehmender Kostenreduktion hohe Wachstumspotenziale von 10 bis 20 Prozent oder mehr.

Daher sollen auf Basis der bisherigen Marktabschätzungen der weltweite Batteriemarkt auch neben LIB sowie die Rolle der LIB darin analysiert werden, um neben neuen Märkten und deren Wachstum auch die Diffusionspotenziale der LIB in etablierten Märkten abschätzen zu können. Hierzu werden ausgehend von dem in 2015 rund 450 GWh Batterieweltmarkt drei Szenarien aus der Perspektive der LIB betrachtet:

Das „Contra LIB“-Szenario geht von einem geringen Wachstum in der Elektromobilität (auch „Contra EV“ mit Bezug auf die Elektromobilität) aus. Gleichzeitig ist dies mit einer weniger rasch fallenden Kostenentwicklung der LIB verbunden und dem Effekt, dass alternative Technologien wie Pb in ihren Märkten die Kostenvorteile und damit Marktposition beibehalten. In diesem für die LIB-Märkte eher konservativen Szenario (vgl. avicenne Energy)<sup>19</sup> liegt das jährliche Wachstum des Batteriemarktes bei nur rund 5 Prozent (für Pb um 4 Prozent, für LIB über 10 Prozent, für LIB in der Elektromobilität bei 10 bis 20 Prozent).

Das „Pro LIB“-Szenario geht von einem sehr positiven, dynamischen Wachstum in der Elektromobilität aus (auch „Pro EV“ mit Bezug auf die Elektromobilität). Die LIB-Kosten lassen sich in diesem Szenario so stark reduzieren, dass sich LIB auch in Anwendungsbereichen der Pb deutlich durchsetzen können. In diesem für LIB-Märkte sehr optimistischen Szenario liegt das jährliche Wachstum bei bis zu 10 Prozent (für Pb nur noch um 1 bis 2 Prozent, für LIB bei 25 bis zu 30 Prozent, für LIB in der Elektromobilität sogar bei 25 bis 40 Prozent).

### Erläuterung zu Abbildungen rechts – Batterieweltgesamtmarkt

**Contra LIB:** geringes Wachstum der Elektromobilität, kaum Konkurrenz zu Pb (Kostenvorteil Pb)

**Trend Szenario:** positive Entwicklung der Elektromobilität, Konkurrenz der LIB zu Pb (vgl. Kosten), LIB greift vermehrt in Pb Märkte ein

**Pro LIB:** hohes Wachstum der Elektromobilität, starke Konkurrenz der LIB zu Pb (Kosten- und Technologievorteil LIB)

**Stationär:** (On- und Off-Grid, <10kWh und >10kWh bis MWh)

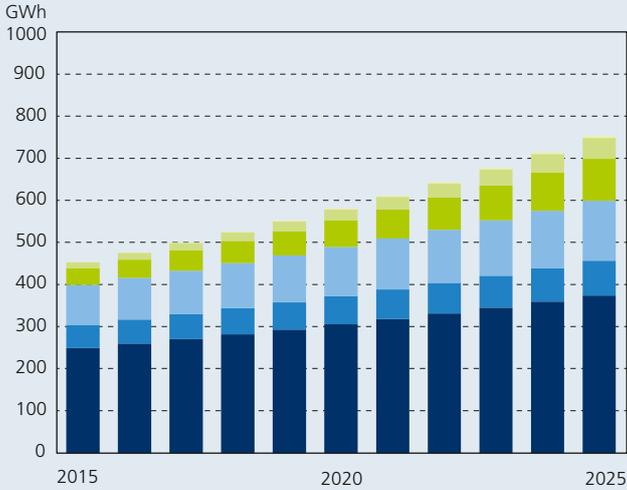
**Elektromobilität:** (Traktion: BEV, PHEV, HEV, Ebikes, LKW, Gabelstapler etc.)

**Mobile Elektronik:** (keine Traktion: Konsumer, Starter, Power Tools etc.)

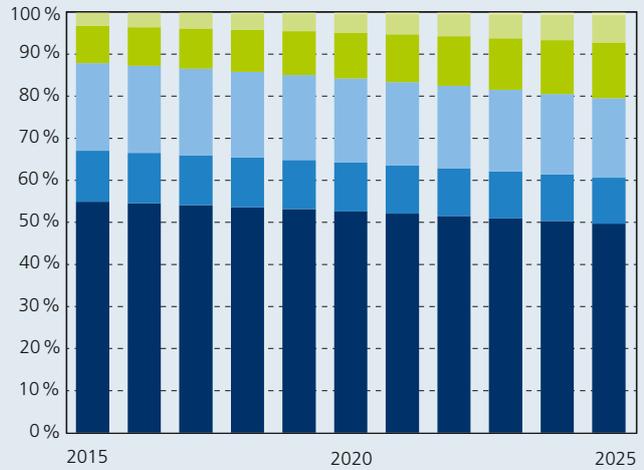
**Andere Batterien:** (NiMH, NiCd, RFB, NaS, ...) <5 %, hier vernachlässigt

# Batterieweltgesamtmarkt (in GWh) in drei Szenarien

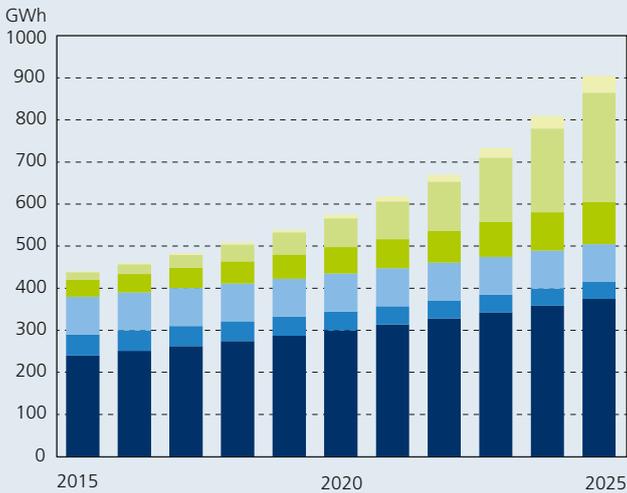
## Contra LIB Szenario



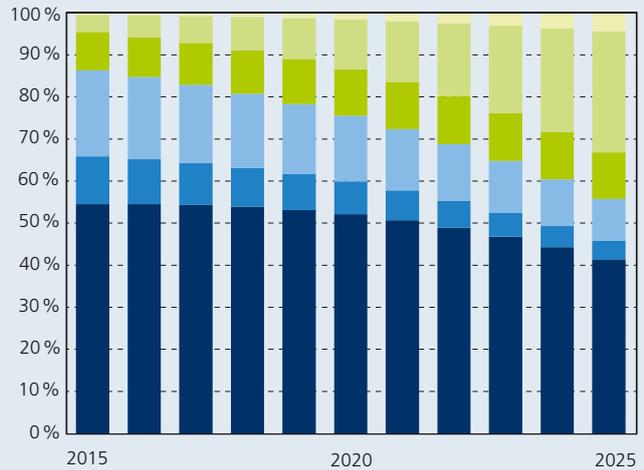
## Contra LIB Szenario



## Trend Szenario



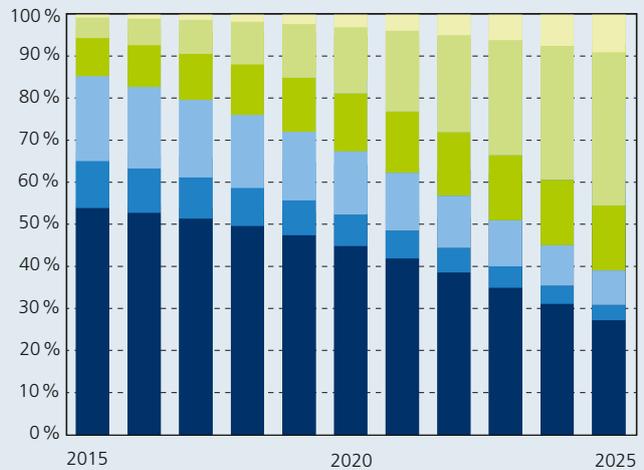
## Trend Szenario



## Pro LIB Szenario



## Pro LIB Szenario



■ LIB – stationäre Speicher   
 ■ LIB – Elektromobilität   
 ■ LIB – mobile Elektronik  
■ Pb – stationäre Speicher   
 ■ Pb – Elektromobilität   
 ■ Pb – mobile Elektronik

Im „Trend-Szenario“ wird entsprechend von einer zwar positiven Entwicklung der Elektromobilität ausgegangen, jedoch werden weitere Märkte weniger stark erschlossen und auch die Pb verliert weniger an Marktanteilen gegenüber der LIB), da z. B. die LIB technische und Kostenvorteile nur bedingt und in einzelnen Bereichen ausspielen kann. In diesem als eher realistisch eingeschätzten Szenario liegt das jährliche Wachstum bei 7 bis 8 Prozent (für Pb bei 2 bis 3 Prozent und für LIB bei rund 20 Prozent sowie für LIB in der Elektromobilität bei sogar 20 bis 30 Prozent).

In den Abbildungen auf Seite 23 sind die drei Szenarien mit globalen Märkten für LIB und Pb in GWh sowie prozentual nach Anteilen für Anwendungen in „mobiler Elektronik“, Elektromobilität und stationären Anwendungen dargestellt. In diesen drei Bereichen sind die zahlreich zuvor diskutierten Einzelanwendungen einsortiert. Da LIB und Pb gegenüber weiteren elektrochemischen Energiespeichern wie NiMH, NiCd, RFB, NaS bereits heute mit zusammen rund 98 Prozent dominieren und nur für RFB und NaS ein Wachstum für stationäre Anwendungen zu erwarten ist, dürfte sich in dem Betrachtungszeitraum durch weitere Batterietechnologien nichts Wesentliches an dem Bild ändern. Somit wird hier der Einfachheit halber nur auf LIB und Pb eingegangen.

Die Einsatzbereiche der LIB in den hier abgegrenzten drei Segmenten sind bereits erläutert worden. Für die Pb sind im Bereich der „mobilen Elektronik“ alle Anwendungen zusammengefasst, in welchen die Batterien weder stationär (z. B. On- und Off-Grid-Anwendungen) noch als Traktionsbatterie (z. B. xEV, Elektrofahräder, Gabelstapler etc.) genutzt werden. Dies können z. B. alle Konsumelektronikanwendungen aber auch Starter-Batterien, Power Tools etc. sein.

Pb haben heute den größten Markt als Starter-Batterien in z. B. PKW, Nutzfahrzeugen, Booten, usw. (aber auch Märkte in medizintechnischen Geräten etc.). Daneben werden sie zur Traktion in Elektrofahrzeugen eingesetzt, z. B. Elektrofahräder in China, ältere Elektroautos, aber besonders noch in Gabelstaplern. Als stationäre Energiespeicher werden sie für den Einsatz in Telekom/Mobilfunk, USV (zusammen rund 80 Prozent am stationären Markt) sowie Stand-by, Kontroll- und weitere Anwendungen im Umfeld stationärer Anwendungen verwendet (siehe auch „Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“).<sup>19,20</sup> Pb werden durch LIB vermutlich kurzfristig am schnellsten in elektromobilen Anwendungen verdrängt, mittel- bis langfristig ggf. auch in den stationären Anwendungen und evtl. auch einmal als Starterbatterien.

## LANGFRIST-SZENARIEN BIS 2050

Die langfristige Entwicklung der Märkte für Lithium-Ionen-Batterien ist aus mehreren Gründen wichtig abzuschätzen: Für die Elektromobilität sind Entwicklungen in der Energiedichte (mit Blick auf die Reichweite) und Kosten (mit Blick auf eine für die breite Bevölkerung erschwingliche Mobilität der Zukunft) zentral. Heute sind neben der LIB keine vergleichbaren alternativen Technologien bekannt, welche den Weg hin zu einer emissionsarmen/-freien Mobilität weisen können. Wenn sich ein Systemwandel Elektromobilität vollziehen lässt, dann wird dies aus heutiger Sicht mit LIB sein (zumindest beginnen) und im Laufe der kommenden 20 bis 40 Jahre realisierbar sein. Dies könnte aber auch eine langfristige Abhängigkeit von nur einer Technologie bedeuten und Implikationen müssten gut verstanden werden.

Daher müssen Marktentwicklungen bis 2025 oder 2030 auch bis 2050 und weiter gedacht werden, um realistisch abzuschätzen, in welchem Kontext und in welcher Dimension sich eine LIB-Nachfrage der Zukunft ergeben kann. Gleichzeitig müssen mögliche langfristige Konsequenzen frühzeitig einsortiert werden, z. B. mit Blick auf eine Rohstoffnachfrage und -verfügbarkeit in der Zukunft, den Bedarf von Material- und/oder Technologie-substitutionen, den Bedarf neuer Produktionstechniken, die Möglichkeiten des Recyclings, Gefahren nicht nur von Rohstoffengpässen, Technologieabhängigkeiten etc. sondern auch wieder steigenden Preisentwicklungen usw.

Für die zuvor vorgestellten Szenarien „Pro LIB“ und „Contra LIB“ werden die potenziellen Marktnachfragen nach LIB daher über 2025 hinaus bis 2050 fortgeschrieben:

Im „Contra LIB“-Szenario (rund 10 Prozent Wachstum) würde sich vor allem die Elektromobilität (auch „Contra EV“) mit einer begrenzten Diffusion (z. B. 10 bis 30 Millionen Elektrofahrzeuge-Neuzulassungen pro Jahr) weniger durchsetzen (rund 10 bis maximal 15 Prozent Wachstum, was sich nach Annahme auch hinderlich auf LIB in stationären Anwendungen auswirken würde mit z. B. auch nur rund 15 Prozent Wachstum (Argument der Kosten). Für Anwendungen in der mobilen Elektronik würde das weiterhin stabile Wachstum von rund 9 Prozent auch in 2015 zu einem dennoch ähnlichen Marktanteil wie LIB für Elektromobile und stationäre Anwendungen führen.

Im „Pro LIB“-Szenario (bis zu 30 Prozent kurzfristiges und über 15 Prozent langfristiges Wachstum) bleibt das Wachstum für LIB in mobiler Elektronik mit rund 8 Prozent auf einem gleichen Niveau, jedoch dominieren LIB in der Elektromobilität (bis zu 20 Prozent Wachstum) auch gegenüber stationären Anwendungen (ca. 18 Prozent Wachstum). Die Substitution von Pb z. B. im Bereich der Starterbatterien ist hier nicht angenommen, jedoch macht selbst dies bis 2050 betrachtet keinen großen Unterschied im Ergebnis. Es ergibt sich ein um das 10-fache größerer Markt als im „Contra LIB“-Szenario mit einer globalen Elektrifizierung des Transportsektors (PKW und weitestgehend Nutzfahrzeuge sowie weitere Elektrofahrzeuge) und über 90 Prozent Nachfrage nach LIB nur durch Elektromobilität.

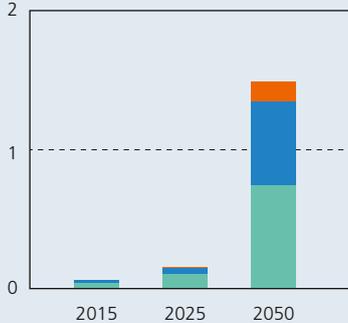
Wie das „Pro LIB“-Szenario zeigt, können bei einem tatsächlichen Gelingen der batteriebasierten Elektromobilität langfristig die Märkte für LIB in Anwendungen der „mobilen Elektronik“ und für die stationäre Energiespeicherung größtenteils gegen-

über einem dann entstehenden Markt für Fahrzeugbatterien gemessen an der Batterienachfrage vernachlässigt werden, welcher dann auf einem Niveau von 10 TWh pro Jahr liegen würde.

Die in der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ abgeleiteten Szenarien („Contra EV“ und „Pro EV“) entsprechen hier in den „Pro LIB“/„Contra LIB“-Szenarien bis 2025/2030 den Entwicklungen der LIB-Nachfrage durch Elektrofahrzeuge. Die Produkt-Roadmap zeigt einen Trend der OEM von kostenoptimierten (Annahme: 25 kWh Batteriegröße) hin zu reichweitenoptimierten (Annahme: Entwicklung von 25 kWh zu 60 kWh oder mehr) Elektrofahrzeugen, wodurch sich neben den Fahrzeugneuzulassungen auch die LIB Nachfrage mit erhöht. Dabei ergibt sich das Bild, dass sich trotz der heute noch zögerlich startenden Nachfrage nach Elektrofahrzeugen langfristig eine Entwicklung weg vom „Contra EV“- hin zu einem „Pro EV“-Szenario vollziehen dürfte.

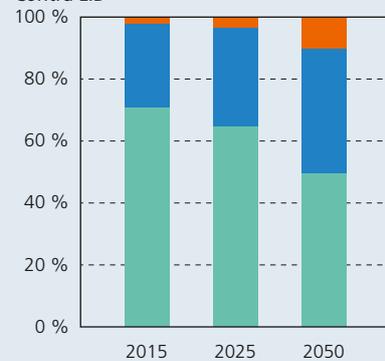
### Langfristszenarien für die LIB Zellenachfrage

Contra LIB  
TWh

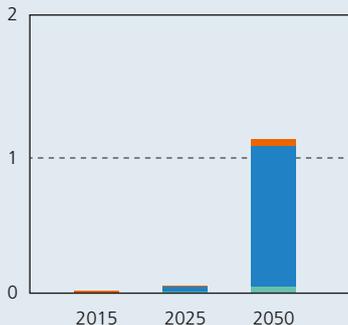


GWh	2015	2025
Stationäre Speicher	1	5
Elektromobilität	15	50
Mobile Elektronik	40	100

Contra LIB

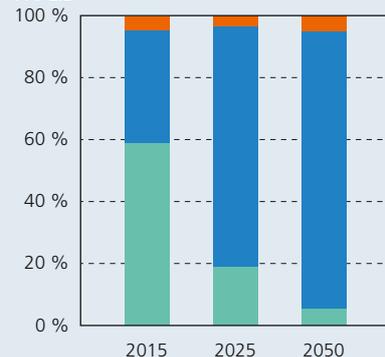


Pro LIB  
10 TWh



GWh	2015	2025
Stationäre Speicher	3	40
Elektromobilität	25	400
Mobile Elektronik	40	100

Pro LIB

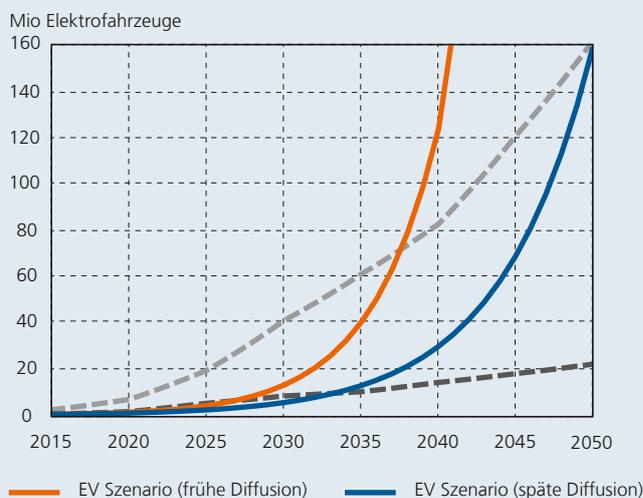


Die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen, welche sich heute noch entlang des 2008 vom Fraunhofer ISI definierten Pluralismus-Szenarios<sup>21</sup> bewegen, könnten sich bis 2025 (mit 2 bis 4 Millionen Neuzulassungen), 2030 (mit 4 bis 12 Millionen Neuzulassungen) schließlich zwischen 2040 (frühe Diffusion, Wachstum ca. 25 Prozent) und 2050 (späte Diffusion, Wachstum rund 18 Prozent) hin zu einer globalen und ggf. vollständigen Verbreitung von Elektrofahrzeugen entwickeln (Trendszenario in der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ mit unter 20 bis 25 Prozent Wachstumsraten, höhere Raten würden weit vor 2040 zu einer vollständigen Diffusion führen).

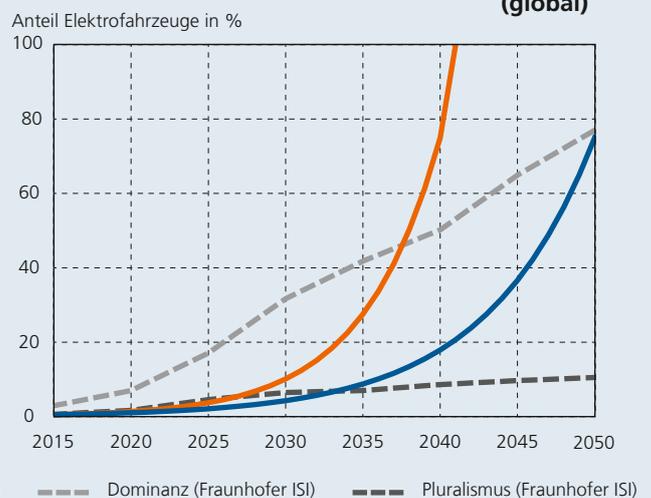
Vor diesem langfristigen Hintergrund würde eine reichweitenoptimierte Elektromobilität eine deutlich höhere Nachfrage mit sich bringen als eine kostenoptimierte Elektromobilität. Jedoch steht auch offen, wie sich eine Brennstoffzellentechnologie als Alternative zu batterieelektrischen Fahrzeugen, zukünftige Ladeinfrastrukturen, Nutzungsmodelle etc. entwickeln.

Für die weiter hinten folgenden Berechnungen einer langfristigen Rohstoffnachfrage wird von dem für 2050 extremeren Szenario (reichweitenoptimiert) ausgegangen und der Effekt einer früheren oder späteren Diffusion gezeigt.

### Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen (global)



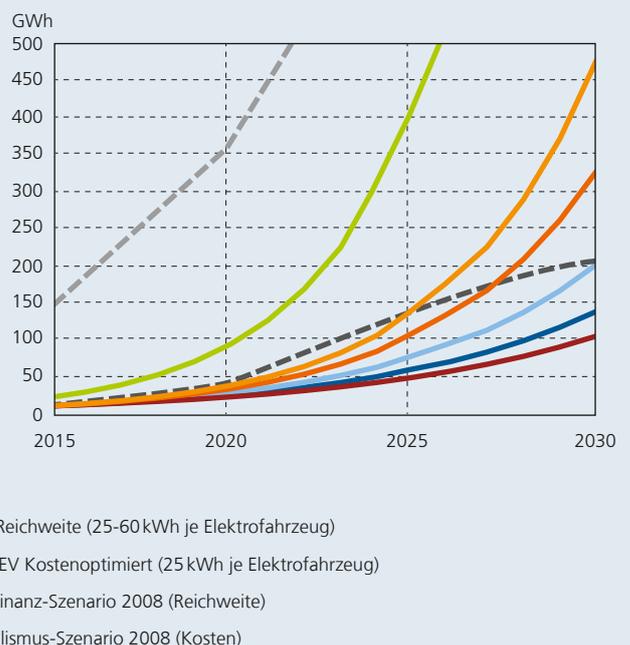
### Anteil der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen (global)



### Bedarfsentwicklung für Elektrofahrzeugbatterien (global) langfristig



### Bedarfsentwicklung für Elektrofahrzeugbatterien (global) 2015 bis 2030



# ALLGEMEINE RAHMENBEDINGUNGEN FÜR ENERGIESPEICHER

Sowohl für die Entwicklung von Energiespeichern für elektromobile als auch stationäre Anwendungen können sich nicht-technische Rahmenbedingungen förderlich (in der Roadmap grün), hemmend (rot) oder auch neutral (gelb) auf eine Nachfrage und folglich Verbreitung auswirken. Diese Rahmenbedingungen lassen sich typischerweise nach den Bereichen Regulierung/Gesetzgebung/Förderung, Infrastruktur und Gesellschaft/Kunden differenzieren und durch Politik und Markt (Industrie) steuern bzw. beeinflussen.

In der **Regulierung, Gesetzgebung und Förderung von Energiespeichern für die Elektromobilität** sind nationale Bestimmungen (z. B. Sonderrechte für Elektromobile im Verkehr) von internationalen Bestimmungen auf EU-Ebene (z. B. CO<sub>2</sub>-Emissionen) und im globalen Umfeld (z. B. Batterietransporte) zu unterscheiden. Dabei zeigen gerade die europäischen CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte für PKW bereits heute/2015 Auswirkungen auf die Entwicklung des Fahrzeugangebotes.

Im Rahmen der im April 2009 verabschiedeten Verordnung stellt der Neuwagen-Flottendurchschnitt von 130g CO<sub>2</sub>/km in 2015 die Ausgangssituation dar und gibt den Automobilherstellern in Europa einige Jahre Zeit, sich auf den Neuwagen-Flottendurchschnitt von 95g CO<sub>2</sub>/km in 2021 vorzubereiten.<sup>22</sup> Für jedes weitere Gramm über den jährlich zulässigen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen werden Strafzahlungen fällig, der Verkauf von z. B. als Sport Utility Vehicle (SUV) bezeichneten Fahrzeugen mit eher überdurchschnittlichem Verbrauch kann aber mit dem Verkauf von z. B. Elektromobilen mit eher unterdurchschnittlichem Verbrauch aufgewogen werden. Für die Nichteinhaltung des Flottengrenzwertes werden bereits seit dem Jahr 2012 jedes Jahr Strafzahlungen fällig, welche abhängig von der Abweichung vom Zielwert unterschiedlich hoch gestaffelt sind.<sup>23</sup> Ab dem Jahr 2019 wird der volle Satz von 95€/g pro g CO<sub>2</sub>/km Überschreitung fällig. Weil die Automobilindustrie praktisch vollständig globalisiert ist, muss natürlich auch die Gesetzgebung auf anderen Kontinenten beachtet werden und dort gesetzte, ggf. noch stärkere Anreize zur Produktion emissionsarmer bzw. elektrifizierter Fahrzeuge beeinflussen auch die Forschung und Entwicklung in Europa sowie letztlich das Fahrzeugangebot auf dem

europäischen Markt. Langfristig und angesichts des fortschreitenden Klimawandels ist eine weitere Verschärfung der europäischen CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte für PKW zu erwarten.

Im Kontext der „Zero Emission Vehicle“-Gesetzgebung wie im US-amerikanischen Kalifornien<sup>24</sup> wurde in Europa das Instrument der „Super credits“ für weitgehend schadstofffreie Fahrzeuge mit unter 50g CO<sub>2</sub>/km in der flottenweiten Anrechnung von Elektromobilen auf die CO<sub>2</sub>-Zielwerte insgesamt eingerichtet. Solche Elektromobile wurden auf die Flottengrenzwerte in einer Übergangsphase gleich mehrfach gezählt und ihre Herstellung hätte damit als Ausgleichsmaßnahme für die Herstellung anderer Fahrzeuge mit höheren Emissionen dienen können.<sup>25</sup> Weil dieses Angebot in seiner ersten Phase allerdings nicht besonders stark durch die Automobilhersteller in Anspruch genommen wurde, wird es auch in einer zweiten Phase von 2020 bis 2023 wieder gelten. Diese Maßnahme sollte eigentlich einen stark förderlichen Aspekt für die Elektromobilität z. B. zur Bereitstellung eines breiten Fahrzeugangebotes darstellen.

Die **Preisentwicklungen** von Benzin, Strom und Batterien sorgen im Idealfall dafür, dass sich sowohl die Kaufpreise als auch Betriebskosten von Elektrofahrzeugen und herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor immer weiter annähern bzw. Elektrofahrzeuge attraktiver werden lassen. Hohe Benzinpreise, niedrige Strom und Batteriepreise wirken dabei förderlich für die Elektromobilität. Konkreter wären aber bei diesen Betrachtungen jeweils der Verbrauch (l/100km bzw. kWh/km) sowie die Anteile der Batteriekosten am Elektrofahrzeug einzubeziehen (siehe vertiefend hierzu die „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“).

Eine standardisierte, flächendeckende **Ladeinfrastruktur** aber auch begleitende bzw. unterstützende **Normen/Standards** (für das Laden, für Batterien etc.) sind wichtig für den breiten Markthochlauf jenseits erster Kunden/Fahrzeugkäufer. Dazu wird es notwendig sein, den Aufbau (mittelfristig) und Ausbau (langfristig) einer halböffentlichen und öffentlichen Ladeinfrastruktur voranzutreiben (inkl. Schnellladestationen für höhere Reichweiten, Komfortladen und langfristig ggf. auch induktivem Laden).

ZEIT →		2015				KURZFRISTIG		
RAHMENBEDINGUNGEN FÜR xEV	Regulierung, Gesetzgebung, Förderung	Regulierung/ Gesetzgebung	CO <sub>2</sub> -Gesetzgebung EU: Neuwagen-Flottendurchschnitt von 130g CO <sub>2</sub> /km in 2015		Bestimmungen für Batterietransport auf Straße	Sonderrechte (kommunal, Leuchttürme)	CO <sub>2</sub> -Gesetzgebung EU: „Super credits“ für schadstofffreie Fahrzeuge (unter 50g CO <sub>2</sub> /km)	
		Preise	Benzinpreis: 1,30-1,60 €/l	Haushaltsstrom: 0,29 €/kWh (2015, Mittelwert)	Batteriepreise: >300 €/kWh (Endunde) < 300 €/kWh (OEM, Überkap.)		Preise für Batterien und	
	Infrastruktur	Ladeinfrastruktur	Standardisierte Ladeinfrastruktur		Aufbau der Ladeinfrastruktur für PHEV/BEV (privat)		Netzintegration/dyn. Stromtarife	
		Normen/ Standards	Ladestecker-/Sicherheits-Norm		Genormte Zellen für HEV-/PHEV-/BEV-Batteriemodule		Harmonisierung der Gesetzgebung	
	Gesellschaft/ Kunden	Akzeptanz & Kosten	Sicherheit des Fahrzeugs	Sicherstellung, dass Strom aus Ern. Energien	Monetäre Kaufanreize (z. B. über Steuern)	Nicht-mon. Kaufanreize (z. B. Bus-spurnutzung)	Neue Mobilitätskonzepte, breitere	
		Angebot/ Geschäftsmodelle	Eigene xEV Plattformen und „purpose Design“ (auch für gewerbl. Anwend.)		Fahrspaß/Design/ Alltagstauglichkeit		Zunehmende Breite des	
RAHMENBEDINGUNGEN FÜR ESS	Regulierung, Gesetzgebung, Förderung	EE-Förderung	Entfall der Netzentgelte für eigene Erzeugung und eigenen Verbrauch		Marktanreizprogramm (MAP) für PV-Energiespeicher und Investitionszuschüsse		Regierung beschließt Smart meter-Rollout	EEG-Novellierung für Energiespeicher im Stromnetz (NS/MS)
		Anreize für Speicher	Novellierung Niederspannungsrichtlinien und EEG		Energiemanagement zur Erhöhung der Betriebsflexibilität von Kraftwerken		Vereinfachte Reservebereitstellung (aus Verteilernetz)	Ausbau MAP für große stationäre Speicher
	Infrastruktur	Stromnetz	Begrenzung der vergütungsfähigen Erzeugung (PV)		PV-Kostendegression (anhaltend)		Standard. Kommunikationssystem	Konkurrenztechn. (z. B. Latent-/ Abwärmespeicher, Brennstoffzelle/ Elektrolyse)
		Kraftwerkspark					Anstoß zur Normung von stationären Speichern	
	Gesellschaft/ Kunden	Akzeptanz & Kosten	Eigensichere Hausbatterie für Privatkunden		Spektakuläre Unfälle, vor allem in Privathaushalten		Regierung beschließt Smart meter-Rollout	Neue Geschäftsmodelle für Speicher- „Bewirtschafter“
		Geschäftsmodelle					Endkundenkompatible Anf. an Betriebsstätte und Logistik	

Für die **gesellschaftliche/Kundenakzeptanz** sind die Sicherheit des Fahrzeugs bzw. der Batterien Voraussetzung. Monetäre und nicht-monetäre Anreize können heute erste Kundengruppen und zukünftig auch der breiteren Gesellschaft den Ein- bzw. Umstieg auf Elektrofahrzeuge erleichtern. Diese dürften aber zunehmend wirksam werden, wenn sich das Fahrzeugangebot verbreitert hat, Preise und Reichweiten der Elektrofahrzeuge zunehmend heutigen „konventionellen“ Fahrzeugen annähern und schließlich das Laden (Schnellladen, Komfortladen etc.) schneller, einfacher und flächendeckend möglich wird.

Während heute für erste Kunden der mittlerweile (technisch) alltagstauglich gewordenen Elektroautos der Fahrspaß oder auch der ökonomische Aspekt im Vordergrund stehen, wird mit einem

zunehmend breiteren Fahrzeugangebot auch die Entwicklung entsprechender Vermarktungs- und **Geschäftsmodelle** wichtig, um breite Kundengruppen und Käuferschichten zur Elektromobilität zu führen.

Hinsichtlich **Regulierung, Gesetzgebung und Förderung für elektrochemische Energiespeicher in stationären Anwendungen** stellte der jüngste Entfall der Netzentgelte für eigene Erzeugung und eigenen Verbrauch sowie das Marktanreizprogramm (MAP) für dezentrale Stromspeicher für PV-Strom<sup>26</sup> und Investitionszuschüsse eine Maßnahme zur Förderung dar. Zum einen verringerten sich die Betriebskosten für die „Bewirtschafter“ von Energiespeichern mit Netzkoppelung und zum anderen galt das rückwirkend zum 1. Januar 2013 eingerichtete und zum

MITTELFRISTIG	2020	LANGFRISTIG	2030	>2030
Neue CO <sub>2</sub> -Grenzwerte	Recycling von Batterien/Entsorgung	CO <sub>2</sub> -Gesetzgebung EU: Neuwagen-Flottendurchschnitt von 95g CO <sub>2</sub> /km in 2021	Sonderrechte (kommunal, Leuchttürme)	„Second life“ von FZG Bat. Ressourcenstrategie
Elektrofahrzeuge sinken	Benzin: >1,80 €/l Benzin: ähnlich 2015	Strom: <0,3 €/kWh Strom: >0,3 €/kWh	Batteriepreise fallen stark Batteriepreise sinken nicht weiter	
Aufbau (mittelfr.) und Ausbau (langfr.) halböffentliche und öffentliche Ladeinfrastruktur			intel. Ladeinfrastruktur (V2G)	
Öffentliche Ladestationen	Öffentliche Schnellladestat.	Komfortladen	Ladeinfrastruktur (privat)	indukt. Laden?
Verschärfte Testbedingungen	Anpassung Batterienormen			
Angebote, sinkende xEV-Preise	Erhöhte Reichweite, Lebensdauer, verb. Ladeinfrastruktur	Restwertkalkulation (u. a. Batterie)	Kosten, Reichweite, Ladeinfrastruktur deutlich verbessert (Annäherung an Verbrenner) → Beginn wirtsch. für Massenmarkt	
Fahrzeug-Angebots	Neue Geschäftsmodelle	Recyclingprozess und Rücknahme läuft problemlos	Zunehmende Konsolidierung von Fahrzeug-, Nutzungs- und Geschäftsmodellen	
Anpassung v. Regul. für Systemdienstl.	Redispatch-Speicher im Verteilnetz	Speicher-/Kraftwerksallokation	Mehr als 35 % EE-Anteil	Leistungsbezogene Netznutzungsentgelte
Gesetzliche Regelungen für Erzeuger/Verbraucher zur Verstärkung von Erzeugung/Verbrauch (Peak shaving)	Regelzonen-Ausweitung	hoher CO <sub>2</sub> -Preis	Mehr als 50 % EE-Anteil (in Deutschland bzw. EU insgesamt)	
Finanzierung des Netzausbaus/-umbaus	Netzausbau	Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur	Reduktion des Must-run	
	2nd use vs. Recycling (Konzepte)		Akzeptanz H <sub>2</sub> -basierter Technologien (Speicher, Verteilung)	
Allgemeine Strompreissteigerung	Steigerung des industriellen Strompreises	Fortschritte bei Elektromobilität (z. B. Kosten)	Akzeptanz H <sub>2</sub> -basierter Technologien (Speicher, Verteilung)	

1. April 2015 sogar schon novellierte MAP als guter erster Schritt, der jedoch nicht ausreichend ist, um das Potenzial von Batteriespeichern zur Systemdienlichkeit zu erschließen. Ein besonderer Akzent wird auch durch die Förderung von Forschung und Entwicklung dezentral eingesetzter Energiespeicher durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ gesetzt.<sup>27</sup> Es gibt aber auch Gegenstimmen, denen zu Folge der Strompreis Marktanzreiz genug darstellt bzw. über ihn Marktanzreize geschaffen werden sollten, damit es ggf. zum flächendeckenden Einsatz von Energiespeichern kommen kann. Eine EEG-Novellierung trat zum 1. August 2014 in Kraft, berücksichtigt „Energiespeicher“ allerdings nicht.<sup>28</sup> Ganz im Gegenteil

stand die vorrangige Einspeisung des „grünen“ Stroms in das Stromnetz im Vordergrund. Die nächste Novelle wird für das Jahr 2016 erwartet.

Die weitere **Förderung erneuerbarer Energien** soll dafür sorgen, dass der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung auf mehr als 35 Prozent im Jahr 2020 und mehr als 50 Prozent im Jahr 2030 in Deutschland bzw. Europa ansteigt. Diese Entwicklung ist als absolut förderlicher Aspekt für die stationäre Energiespeicherung anzusehen, weil damit auch die Förderung dezentraler Energieversorgung einhergeht, welche eine Umkehr von der klassischen Energieversorgung mit zentralen z. B. Atomkraftwerken bedeutet. Hinsichtlich der Regulierung besteht großer Regelungsbedarf im Wiederaufbau des europäischen

Treibhausgas-Emissionshandels (hohe CO<sub>2</sub>-Preise). Ein hoher CO<sub>2</sub>-Preis hat langfristig einen positiven Einfluss auf die Energiespeicherentwicklung. Mittelfristig, mit einem großen Anteil an konventioneller Erzeugung im Netz bzw. der Verstärkung des Speichereinsatzes entsteht allerdings noch kein CO<sub>2</sub>-Benefit für bzw. durch stationäre Energiespeicher. Eine Ersparnis würde erst dann resultieren, wenn der Anteil an erneuerbaren Energien im Gesamtsystem signifikant steigt.

Aus **Infrastruktur** Perspektive wird mittelfristig ein langsamer Ausbau des deutschen und europäischen Stromnetzes stattfinden und damit auch die Verbreitung von stationären Energiespeichern zunehmen. Die Finanzierung des Netzausbaus/-umbaus wird dabei voraussichtlich hohe öffentliche Mittel in Anspruch nehmen, für den Bedarf von Energiespeichern ist der Netzausbau dabei zunächst als hemmender Faktor einzustufen. Wichtig ist die Unterscheidung, welche Stromnetze in den nächsten Jahren gebaut werden sollten: Sollte es mehr dezentrale Energieversorgung geben, so wird sich die Entwicklung letztlich doch förderlich für Energiespeicher auswirken.

Langfristig können Energiespeicher Teil einer „smarten“ Infrastruktur (Smart Grid) werden, wobei sich nicht nur technisch auf Basis der in Elektrofahrzeugen und stationären Speichern eingesetzten Technologien Überschneidungen bzw. Synergien ergeben sondern auch Geschäftsmodelle wie 2nd use von Fahrzeugbatterien in stationären Anwendungen, die Ein-/Anbindung der Elektrofahrzeuge ans Netz (engl. „vehicle to grid“, Abkürzung

V2G) in einer bidirektionalen flächendeckenden Ladeinfrastruktur, etc. zwischen beiden Bereichen zunehmend verschränken (auch „Smart Mobility“).

Für die **gesellschaftliche/Kundenakzeptanz** ist es dabei wieder zentral die Sicherheit der Technologie/ Batterie zu kommunizieren (spektakuläre Unfälle vor allem in Privathaushalten wären problematisch). Mittel- bis Langfristig wirkt sich eine zu erwartende allgemeine Strompreissteigerung bei gleichzeitigem Sinken der Batteriepreise (wieder auch durch die Entwicklung in der Elektromobilität) förderlich auf die Marktentwicklung von Energiespeichern aus. Dezentrale Speicher für die Eigenbedarfsoptimierung bzw. einer zunehmenden Autarkie des Verbrauchers gewinnen an Bedeutung.

Gerade die parallelen und voneinander abhängigen Entwicklungen der Energiespeichertechnologien und der ihre künftige Nachfrage beeinflussenden Rahmenbedingungen zeigen die komplexen aber sich künftig noch deutlich weiter verschränken Verbindungen zwischen Mobilität bzw. dem Transportsektor, der Energiewirtschaft und dem Stromnetz etc. Förderliche Maßnahmen für eine Technologie können hinderlich für andere wirken und daher ist zunehmend ein breites, umfassendes ebenso wie tiefes Gesamtsystemverständnis wichtig, um zur richtigen Zeit die richtigen Rahmenbedingungen zu setzen und die Entwicklung einer nachhaltigen Mobilität ebenso wie einem intelligenten Energiesystem und vernetzten Infrastrukturen zu schaffen.

# TECHNOLOGIEBEZOGENE RAHMENBEDINGUNGEN FÜR ENERGIESPEICHER

Neben allgemeinen politischen, markt- und gesellschaftlich relevanten Rahmenbedingungen ist es auch wichtig die für spezifische elektrochemische Energiespeichertechnologien relevanten Rahmenbedingungen (abseits der reinen Leistungsparameter und Kosten) zu betrachten, um festzustellen, in wie fern im Fall der Lithium-Ionen-Batterien (LIB) z. B. technologieabhängige Einflussfaktoren förderlich oder hinderlich auf die gezeigten Entwicklung wirken können. Solche technologiespezifischen Faktoren können eingesetzte Rohstoffe, Substitutionsmöglichkeiten auf Material- bis Technologieebene, Recycling, Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Footprints bei der Herstellung, im Einsatz bis zum Recycling (engl. „life cycle assessment“ bzw. -Lebenszyklusbewertung, Abkürzung LCA) ebenso wie Fragen technologischer Synergien betreffen. Solche Rahmenbedingungen werden zusammengefasst für die folgenden Aspekte diskutiert:

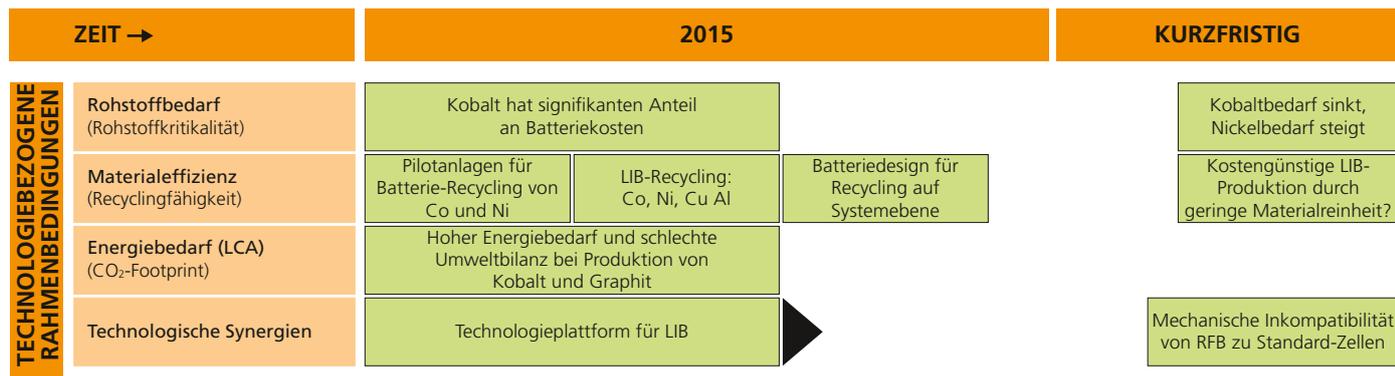
- Rohstoffbedarf (Rohstoffkritikalität),
- Materialeinsatz (Recyclingfähigkeit),
- Energiebedarf (LCA, CO<sub>2</sub>-Footprint),
- Technologische Synergien.

## ROHSTOFFBEDARF (ROHSTOFFKRITIKALITÄT)

Die Roadmap zeigt die zentrale Rolle von Hochenergie NMC und NCA und damit Nickel- sowie Kobalt-basierten LIB-Technologien für die Elektromobilität auf. Mit dem erwarteten Markthochlauf ist daher dringend die Frage des künftigen Bedarfs und der Verfügbarkeit möglicherweise kritischer Rohstoffe anzugehen. Kobalt wurde z. B. in die Liste der kritischen Materialien aufgenommen, da die überwiegende Produktion in Krisengebieten wie z. B. dem Kongo stattfindet (großer Lieferant mit ca. 50 Prozent der aktuellen Weltproduktion), und daher ggf. nicht von einer langfristigen und sicheren Versorgung ausgegangen werden kann. Zusätzlich ist Kobalt als Rohstoff (gemessen an anderen Rohstoffen) selten. Auch tritt Kobalt als Kuppelprodukt mit Nickel und Kupfer auf (d.h., dass egal welche Technologie sich durchsetzt, bei der Erhöhung der Produktion des einen Rohstoffes auch

die Produktion der anderen steigt – d. h. es können **technologieübergreifende Austauschereffekte** stattfinden). Weiterhin hat Kobalt einen hohen Energiebedarf bei der Förderung und Aufbereitung und daher einen hohen Marktpreis (zwischen 2010 bis 2014 bei 20-30 USD\$/kg)<sup>29</sup>. Gerade für Kobalt ist wegen des Preises davon auszugehen, dass es langfristig durch Recycling eine gute Kreislaufführung geben wird. Zum Vergleich lagen die Preise für Nickel bei 17–20 US\$/kg und für Lithiumcarbonat (chemische Summenformel Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) oder Lithiumhydroxid bei 6–8 US\$/kg in diesem Zeitraum.<sup>30</sup> Somit stellt sich für einige der in LIB aber auch insgesamt in Elektrofahrzeugen eingesetzten Rohstoffe die Frage der zukünftigen Verfügbarkeit, des Zugangs sowie der Preisentwicklung bei einer deutlich ansteigenden Nachfrage.

Generell lässt sich bei der Rohstoffversorgung eine große Abhängigkeit von politischen Rahmenbedingungen feststellen. So hat z. B. die europäische Rohstoffversorgungsstrategie bzw. die High-Tech-Strategie zum Ziel, internationale Rechte an Rohstoffen zu sichern, um erfolgreich den Rohstoffbedarf decken zu können. Wenn aber ein Hauptproduzenten-Land plötzlich den Export beschränkt, kann es schnell zu einer Rohstoffknappheit kommen (z. B. die Diskussion um die Seltenen Erden in China in den letzten Jahren). Hier könnte man überlegen, technologisch entgegenzusteuern und auf Basis der Zellchemie versuchen, diese Rohstoffe nicht mehr so stark einzusetzen, bei welchen eine starke Importabhängigkeit besteht und die Förderländer beispielsweise politisch instabil sind, sofern sich dies in der Technologieentwicklung berücksichtigen lässt. Diese Aspekte der Integration von Rohstoffstrategien in der FuE sind bereits zunehmend in Forschung und Industrie zu beobachten und stellen oftmals bereits einen weiteren „Schlüssel- bzw. Leistungsparameter“ dar. Dies zeigt aber auch, dass die zunehmend komplexen Abhängigkeiten von Rohstoffproduktion und -verfügbarkeit, Möglichkeiten der Rohstoff- oder Technologiesubstitution, Technologie- und Marktnachfrage bis zum Recycling künftig deutlich besser bewertet und verstanden werden müssen, um nachhaltige Strategien abzuleiten und zu entwickeln. Dies soll am Beispiel Kobalt weiter verdeutlicht werden.



Kobalt hat heute noch einen signifikanten **Anteil an den Batteriekosten** (bei den oben genannten Preisen und typischen BEV mit 25 kWh rund 400 USD\$/Fahrzeugbatterie und damit 5 bis 10 Prozent an den System- bzw. Zellkosten). Zudem könnten sich langfristig durch einen höheren Rohstoffbedarf von Kobalt die Kosten für diesen Rohstoff noch erhöhen, daher werden auch weiterhin Substitute gesucht: Durch den technischen Wandel und die Kathodenentwicklung hin zu Co-reduzierten HE-NMC-Materialien (NMC:111 bis hin zu NMC:811) wird der **Kobaltbedarf** in den kommenden Batteriegenerationen deutlich **sinken**, der **Nickelbedarf** hingegen weiter **steigen**. Hierbei hilft also der technische Wandel durch Co-reduzierte Batterien den Rohstoffeinsatz deutlich zu reduzieren. Reine Schichtoxide (Lithium-Nickel-Mangan-Oxide) sind ganz ohne die Verwendung von Kobalt beispielsweise nicht in Sicht. Andererseits ist auch nicht auszuschließen, dass längerfristig Materialien wie Lithium-Kobalt-Phosphate interessant werden, da sie durch die Verwendung von Kobalt mit deutlich höheren Zellspannungen arbeiten können. Dies könnte wiederum zu einem steigenden Kobalteinsatz führen. FuE kann somit aber zu Materialinnovationen führen, welche deutliche Auswirkungen auf den Rohstoffbedarf der Zukunft haben.

In 2014 lag die Jahres(minen)produktion von Kobalt bei 112 000 Tonnen<sup>31</sup> (mit 56 000 Tonnen = 50 Prozent aus dem Kongo). Die Kobalt-Raffinade-Produktion lag dabei bei rund 92 000 Tonnen<sup>32</sup> weltweit. Würden die Zellchemien mit reinem Kobalt (NMC:111) weiterhin Anwendung finden, so würde dies eine jährliche Nachfrage von einer Millionen Elektrofahrzeugen (BEV/PHEV) über 10 000 Tonnen (dies ist für ca. 2020 wahrscheinlich) und ab 8 Millionen Elektroautos rund 100 000 Tonnen (dies wird ab 2025 bis 2030 wahrscheinlich) Kobaltnachfrage mit sich bringen.

Die Nachfrage nach Kobalt lag in 2014 bei 81 000 Tonnen, wovon rund 41 Prozent (33 000 Tonnen) durch Batterien nachgefragt wurden (LIB-Zellproduktion, insbesondere Gerätezellen für die

Konsumelektronik). Die Nachfrage aus dem gerade ansteigenden xEV-Markt lag geschätzt bzw. umgerechnet bei rund 2500 Tonnen und damit gerade 3 Prozent der globalen Nachfrage. Dies bedeutet, dass innerhalb der kommenden 10 Jahre der Kobaltbedarf alleine für Elektrofahrzeuge auf das Niveau der heutigen Weltproduktion anwachsen würde.

Durch Co-reduzierte Batterien kann diese Nachfrage nun bis 2020 bzw. 2025 auf wenige Tausend bis 20 000 Tonnen gesenkt werden. Jedoch werden die ab 2020 angekündigten Elektrofahrzeuge mit zunehmend längeren Reichweiten und höherer Batteriekapazität diesem Effekt ein Stück weit entgegenstehen. Andererseits bleibt zu beobachten, wie stark und schnell genau Co-reduzierte Batterien in den Markt kommen und in Elektrofahrzeugen diffundieren.

Aus der Perspektive der Rohstoffproduktion wird es für Batteriehersteller daher notwendig sein, entsprechende Rohstoffe in solchen Mengen kurz- bis mittelfristig verfügbar zu haben (neben **Kobalt** wären z. B. auch **Naturgraphit** und Lithium zu beobachten; die Nachfrage nach **Nickel** wird z. B. weiterhin aus anderen Anwendungen dominiert).

Langfristig stellen sich jedoch für eine **Bewertung und Rohstoffstrategien** ganz andere bzw. vielfältigere Fragen:

- Wie entwickeln sich die Verwendungen einzelner Rohstoffe innerhalb der LIB-Technologien (technischer Wandel wie bzgl. NMC diskutiert)? Ist eine Reduktion, Substitution oder ein Technologiewechsel (auch auf Post-LIB) überhaupt möglich?
- Wie verändert sich die Nutzung der LIB in den Anwendungen (z. B. Trend zu größeren Batteriekapazitäten)?
- Wie entwickelt sich die Marktnachfrage, d. h. in Elektroautos aber auch anderen Fahrzeugen, stationären Anwendungen sowie die Diffusion der LIB innerhalb dieser Anwendungen und damit Rohstoffnachfrage nach diesen Technologien?



Technologie-spezifische Rahmenbedingungen

- Wann greift ein Recycling, ist eine Kreislaufführung wirtschaftlich? Wie stehen Second use-Anwendungen einer Rückführung entgegen?
- Reichen die Rohstoffreserven und -ressourcen, welche für LIB in elektromobilen und stationären Anwendungen genutzt werden für eine globale Elektrifizierung und die in dieser Roadmap skizzierte mögliche Nachfrage?

Andererseits werden keine Fahrzeuge gekauft bzw. produziert wegen der zu gering ausgebauten Infrastruktur (Wasserstoff, Tankstellen). Der Aufbau einer H<sub>2</sub>-Infrastruktur ist damit ein kritischer und limitierender Faktor. Auch **Edelmetalle** für Brennstoffzellen sind dabei als kritische Rohstoffe zu betrachten.

### MATERIALEFFIZIENZ (RECYCLINGFÄHIGKEIT)

Auf all diesen Ebenen können sich dabei enorme Änderungen (teilweise viele 100 Prozent) in einer Nachfrage ergeben. Auf Basis der in dieser Roadmap eingeschätzten Marktentwicklung für LIB, der in den Produkt- und Gesamt-Roadmaps zu Energiespeichern für die Elektromobilität analysierten Entwicklungen von Fahrzeugkonzepten und der darin verwendeten Batterien sowie weiteren Studien der letzten Jahre können diese Fragen zumindest in Szenarien adressiert und entsprechende Effekte abgeschätzt werden.

Das Recycling von Batterien ist bereits aktuell durch die Batteriedirektive vorgeschrieben (es müssen ca. 50 Massenprozent recycelt werden). Daher existieren heute schon **Pilotanlagen für Batterie-Recycling** von Kobalt und Nickel, allerdings ist das Recycling ein sehr energieintensiver Prozess. Mit heutigen Verfahren können bei Aktivmaterialien daher nur Nickel und Kobalt wirtschaftlich zurückgewonnen werden, Lithium verbleibt hingegen (heute noch) in der Schlacke. Als weiteres zukünftig wirtschaftlich recycelbares Aktivmaterial wird auch Mangan gesehen. Obwohl durch die weltweite Düngemittelproduktion auch Phosphat langfristig knapp zu werden droht, ist aktuell kein wirtschaftliches Recycling von Eisenphosphat abzusehen, da die Rohstoffe zu günstig sind. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit des Recyclings von Kobalt, Nickel und Mangan ist, dass die Materialien weiterhin mit relativ hohen Anteilen in den Zellchemien verbaut werden. Durch eine Substitution dieser Materialien und eine entsprechende Bedarfsreduktion kann das Recycling im Umkehrschluss sogar wieder unwirtschaftlich werden.

Langfristszenarien des Rohstoffbedarfs für Lithium und Kobalt werden daher ab Seite 36 vertiefend betrachtet.

Ein Wiederverwenden der Aktivmaterialien durch Waschen scheitert aktuell an der nicht gegebenen Wirtschaftlichkeit, es lassen sich jedoch prinzipiell bestimmte Kathodenmaterialien sowie sphärische Graphite zurückgewinnen und stofflich wiederverwerten. Lithium-Eisenphosphat (LFP) ist jedoch in der notwendigen Reinheit nicht wiederzuerlangen.

Neben den Batterien müssen aber auch andere Komponenten der Elektromobilität für deren Entwicklung berücksichtigt werden. 2011 hat China den Export von Seltenen Erden um 20 bis 30 Prozent reduziert und damit weltweit für Knappheit gesorgt. **Seltene Erden** wurden für Elektromotoren als kritisch beurteilt. Dementsprechend gab es hohe Entwicklungstätigkeiten, um Seltene Erden in Elektromotoren zu substituieren. Neodym, Dysprosium und Terbium sind die wichtigsten Seltenen Erden. Neodym wird aktuell in neuen Förderstätten gefördert. Dysprosium und Terbium, die schweren Seltenen Erden, können weltweit nur in China sinnvoll gefördert werden (Dysprosium wird z. B. für die Temperaturbeständigkeit benötigt).

Die **Wasserstoffinfrastruktur** hingegen ist ein entscheidender Punkt für die Verbreitung von Brennstoffzellenfahrzeugen.

Für das Recycling gilt zu beachten: Während billige Materialien für eine wirtschaftliche Produktion benötigt werden, lohnt es sich jedoch nicht, günstige Materialien für Batterien zu recyceln. Politische Rahmenbedingungen können jedoch die Wirtschaftlichkeit von Recycling erhöhen. Wegen der geringen Reserven der für ein **LIB-Recycling** relevanten Materialien in Europa wird es daher (gerade künftig) sinnvoll sein, die einmal aus den Herkunftsländern bezogenen Rohstoffe durch Recycling in Deutschland bzw. der EU zu behalten, da sonst eine Abhängigkeit von Rohstoffimporten besteht. In Deutschland und in der EU sind besonders Kobalt, Nickel, Kupfer und Aluminium wirtschaftlich zurückzugewinnen. Aluminium wird z. B. für Batterien mit metallischem Gehäuse verwendet.

Bereits heute wird das **Batteriedesign für Recycling** auf Systemebene in der Produktion mitgedacht und entsprechend angepasst. Dies ist nicht nur eine Frage des Recyclings, sondern auch eine Frage der Wartungsfreundlichkeit, schließlich muss ein Austausch von Modulen möglich sein.

Anstelle der momentan sehr reinen Materialien, welche für LIB verwendet werden, könnte mittelfristig über eine **kostengünstige LIB-Produktion** durch geringere Materialreinheit und somit auch weniger energieintensive Produktion nachgedacht werden. Dies ist ein wichtiger Punkt bei Lithium-Eisenphosphat. Eisen gilt als günstiger Rohstoff, muss jedoch für die Verwendung in LFP-Batterien unter hohem Energieaufwand gereinigt werden, bis es den Anforderungen an den Reinheitsgrad für Batterien genügt. Dieser Prozess ist sehr teuer. Es muss allerdings beachtet werden, dass eine Steigerung der Energiedichte, einer Substitution mit weniger reinen Materialien entgegensteht. Auch ist die Reinheit des Materials entscheidend für die Qualität und eine geringere Reinheit wirkt sich stark negativ auf die Lebensdauer aus. Daher wird dem Thema zwar bereits mittelfristig eine hohe Bedeutung beigemessen, jedoch gehen aktuelle Entwicklungen in der Materialeffizienz eher in die Richtung einer Produktionsprozessoptimierung.

Beispielsweise kann von einer wesentlichen Verbesserung der Effizienz ausgegangen werden, wenn vom Labormaßstab zur großtechnischen Produktion übergegangen wird. Bei den Prozessen von LIB-Zellen des Typs 18650 wird ein Ausschuss von ca. 1 bis 2 Prozent in der Massenproduktion erzielt. Der Ausschuss bei großen Zellen liegt heute noch bei ca. 10 bis 20 Prozent, mittelfristig wäre das Ziel 3 bis 5 Prozent, langfristig sogar 1 Prozent für die großformatigen Zellen zu erreichen.

Auf der Zellebene wird das Recycling momentan noch nicht mitgedacht, da der Fokus der Hersteller hier auf der Reichweite, Sicherheit, sowie der Energie- und Leistungsdichte liegt. Allerdings existieren Design-Förderprojekte für Recycling auf

Zellebene. Ein integratives Vorgehen des **Batteriedesigns für Recycling auf Zellebene** könnte mittelfristig angegangen werden.

Nach den Automobilrichtlinien muss die Batterie zu einem bestimmten Prozentsatz stofflich wiederverwertet werden. Es ist daher nur eine Frage der Zeit, bis auch das **Recycling weiterer Metalle** wie Aluminium, Lithium, Mangan oder Kupfer erfolgt. Dies geschieht zwar teilweise schon auf Systemebene, allerdings noch nicht auf Zellebene. Ansonsten bietet sich nur noch eine thermische Verwertung an. Das Recycling dieser Stoffe wird mittelfristig bis 2020 erwartet.

Um 2020 werden auch **günstigere Recycling- und Trennverfahren** erwartet. Da häufig nicht die Rohstoffe, sondern die Prozesse teuer sind, macht es Sinn, die Elektroden bzw. das Aktivmaterial zu waschen und auf der letzten Stufe wiederzuverwenden, anstatt die Ausgangsrohstoffe zu recyceln.

In den heutigen Pilotanlagen werden kleine LIB pyrolytisch oder metallothermisch zerstört und recycelt, beispielsweise in einer Anlage von Umicore. Anders geht das Unternehmen Accurec Recycling GmbH vor, hier werden in einer kleinen Anlage die Batterien vor dem Recycling zunächst auseinander gebaut und das Lithium wird aus dem Staub der Rauchgasanlage zurückgewonnen. Zukünftig werden wegen der größeren Batteriesysteme und der großen Menge an LIB entsprechend größere Anlagen benötigt. Die Entwicklung der Anlagen ist direkt abhängig von dem Zeitpunkt, wo die ersten größeren Batteriesysteme recycelt werden müssen. Daher werden Infrastrukturen für Recycling und mehrere große **Recyclinganlagen in der EU** jenseits 2020 gebraucht werden. Problematisch ist heute unter anderem der Transport, da sich die Sicherheitsvorschriften dafür auf einem sehr hohen Niveau befinden. Außerdem wird grundsätzlich ein umfassendes Rücknahmesystem benötigt. Wegen der Gefahrguttransporte und Logistik dürften daher mehrere größere Anlagen in der EU jenseits 2020 aufzubauen sein.

## **ENERGIEBEDARF (LCA, CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT)**

Energiebedarf (LCA, CO<sub>2</sub>-Footprint) deutet darauf hin, dass anstelle einer Konzentration auf den CO<sub>2</sub>-Footprint bei der Produktion auch eine komplette LCA (eine Analyse von der Produktion über die Nutzungsphase bis hin zum Recycling der Batterie) notwendig ist, um verschiedene Technologien zu vergleichen. Der Grund dafür ist, dass es Technologien gibt, welche bei der Produktion viel CO<sub>2</sub> benötigen, aber dafür in der Nutzungsphase CO<sub>2</sub> einsparen. Zudem sollten Nachhaltigkeitskriterien wie der Wasserverbrauch, der Landverbrauch, die Versauerung

und Toxizität sowie die Entsorgung in Vergleich mit einbezogen werden. Auch die Betriebssicherheit bestimmter Technologien sollte Beachtung finden.

Hinsichtlich des Energieeinsatzes werden bei der Herstellung von NiMH für eine Wattstunde (Wh) etwa 500–600 Wh an Primärenergie benötigt. Der Energiebedarf von (großformatigen) LIB wird als ähnlich oder höher eingeschätzt.

Dabei ist die Produktion von Aktivmaterialien sehr energieintensiv. Es ist von einem hohen Energiebedarf und einer **schlechte Umweltbilanz bei der Produktion von Kobalt und Graphit** auszugehen. Das Umweltprofil der Produktion wird von sich überlagernden Effekten beeinflusst. Eine Strategie mit dem Ziel, günstige Zell-Technologien zu entwickeln, indem Materialien mit geringerer Reinheit verwendet werden, hat deutlich negative Auswirkungen auf die Lebensdauer und die Zyklenzahl und führt daher zu einer Beeinträchtigung des Umweltprofils. Diese Entwicklung ist daher weniger wahrscheinlich. Das größte Potential dürfte daher in der Reduktion des Kobaltanteils in den Zellchemien liegen, wenn es dadurch nicht zu signifikanten Leistungseinbußen kommt. Für eine Evaluation ist jedoch eine präzisere Datenlage bei den Herstellprozessen nötig. Im Vergleich zu Nickel stellt Kobalt das energieintensivere Material dar, obwohl sie beide als Kuppelprodukte auftreten. Entscheidend hierfür ist der Energiemix in den Förderländern. In Afrika z. B. hat Braunkohle einen großen Anteil am Strommix, zudem existiert keine Abgasverordnung und somit gibt es keine Abgasnachbehandlung. Dies führt zu hohen Emissionen. Da je nach Miene Kobalt seltener vorkommt als Nickel, ist der Energiebedarf bei der Förderung höher und Kobalt wird dementsprechend teurer gehandelt. Dieser Effekt wird bei Kuppelprodukten berücksichtigt. In anderen Förderländern, wie z. B. in Kanada, kann die Kobaltproduktion andere Umwelteinflüsse haben.

Auch für die Aufbereitung von häufig vorkommenden Materialien wie Graphit fällt ein hoher Primärenergiebedarf an. Bei Graphit müssen 3000 Grad Celsius über mehrere Stunden für eine entsprechende Reinheit erzeugt werden. Dies führt sowohl zu einer schlechten CO<sub>2</sub>-Bilanz als auch zu weiteren Emissionen, und je nach Produktionsland auch zu Versauerung (abhängig vom Strommix). Insgesamt kommt es stark darauf an, in welchem Land die Werkstoffe hergestellt werden, da der länderabhängige Energiemix einen wesentlichen Einfluss auf die Umweltbilanzen hat.

In einem **optimistischen Szenario** wird die **Verbesserung der Umweltbilanz** durch diverse positive Einflussfaktoren skizziert. Dieses Szenario basiert auf den Annahmen, dass im Jahr 2020 ein besseres Recycling möglich ist, der Strommix sich wegen politischer Rahmenbedingungen in die Richtung erneuerbarer

Energien verlagert, die Prozesseffizienz höher ist, sowie technologisch eine höhere Energiedichte bei den Batterien erreicht wird. Dadurch kann im Zusammenwirken dieser positiven Einflüsse ein besseres Umweltprofil pro kWh Batterien erreicht werden.

In einem **pessimistischen Szenario** resultiert eine schlechte Umweltbilanz durch Verknappung von Kobalt und einen hohen Energieaufwand beim Recycling. Die Verknappung von Kobalt kann ihre Ursache beispielsweise in einer unzureichenden Substitution von Kobalt in den Zellchemien haben. Auf diese Weise verschlechtert sich das Umweltprofil in der Materialherstellung.

## TECHNOLOGISCHE SYNERGIEN

Ein zentraler Punkt in der Entwicklung von Technologien ist die Anschlussfähigkeit einer neuen Technologie an die bereits bestehende Zellfertigung. Etablierte Produktionslinien für Zellen mit Standardmaterialien werden bei Inkompatibilität zu neuen Materialien wegen zu hoher neuer Investitionen eher nicht umgerüstet. Bei einer leicht abweichenden Rezeptur besteht die Möglichkeit einer Umrüstung, sollten aber beispielsweise für Lithium-Schwefel-Batterien (Li-S) gänzlich andere Beschichtungsverfahren, Schneidverfahren oder Umgebungsbedingungen benötigt werden, wird die Entscheidung immer auf die Drop-in-Technologie fallen, da hier weniger Investitionen aufgewendet werden müssen (vorausgesetzt, die Technologien haben in etwa das gleiche Verhalten). Es wird daher auch langfristig stets darum gehen, **Plattformtechnologien** zu identifizieren, welche über eine gute Anschlussfähigkeit verfügen.

Die Entwicklung von LIB wird durch eine Anschlussfähigkeit in der Produktion gestützt, da bereits existierende Produktionslinien beibehalten werden können. LIB mit ähnlichen Zellchemien stellen zudem eine Art Technologieplattform für LIB mit entsprechendem Synergiepotential innerhalb der LIB-Entwicklung dar. Für Li-S ist eine Anschlussfähigkeit z. B. noch unklar bzw. zweifelhaft. Für Redox-Flow-Batterien (RFB) in stationären Anwendungen wird in den kommenden Jahren noch mit Entwicklungshemmnissen gerechnet, verursacht durch die **mechanische Inkompatibilität von RFB** zu Standard-Zellen und entsprechend problematischer Anschlussfähigkeit.

# ROHSTOFFBEDARF UND -VERFÜGBARKEIT

Aufgrund des sich abzeichnenden künftig hohen Bedarfs der genannten Rohstoffe in LIB gibt es seit den letzten Jahren bereits zahlreiche FuE-Aktivitäten. Es stellen sich konkrete Fragen, z. B.:

- Wie wird der künftige Rohstoff-Verbrauch verteilt sein?
- Kann man den stark steigenden Bedarf nach Lithium, Kobalt, Nickel, Graphit etc. mit den vorhandenen Ressourcen decken?
- Welche Rolle können hierbei der technische Wandel und ein Recycling einnehmen?

Bei der Bewertung und Einschätzung der Rohstoff-Vorkommen und der Nachfrage bzw. des Bedarfs (z. B. zu Lithium oder Kobalt)<sup>33</sup> gibt es unterschiedliche Herangehensweisen bzw. sind diese oft zu unterschiedlichen Zeitpunkten und mit unterschiedlichen Annahmen getroffen worden, z. B. bzgl. des Diffusionsgrads der Elektromobilität, der Größe der Fahrzeugbatterien, der Annahmen über die verwendeten Zellchemien und der Menge der darin verwendeten Rohstoffe, etc. Dies führt in der Literatur ggf. auch zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen über die Reichweite der weltweiten Rohstoff-Vorkommen. Die aus der Literatur zu entnehmenden Ansichten und Berechnungen lassen sich unter der Einstellung der jeweiligen Annahmen in Modellen jedoch reproduzieren. Für die folgenden Berechnungen steht vielmehr eine Analyse der Einflussfaktoren auf die Rohstoffnachfrage und -verfügbarkeit im Vordergrund.

Auf Basis eigener Berechnungen werden nun folgende Szenarien und Annahmen zu Grunde gelegt:

Zunächst werden die langfristigen und insbesondere extremeren der als realistisch erachteten Szenarien für die (wie gezeigt langfristig dominierende) Elektromobilität betrachtet. Hierzu werden die zuvor erarbeiteten, durch vielfältige Marktprognosen (u. a. auch aus der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“) abgeleiteten, Langfristszenarien bis 2050 herangezogen. Genauer wird angenommen, dass sich globale Fahrzeugneuzulassungen (PKW und Nutzfahrzeuge) wie in den vergangenen 35 Jahren auch bis 2050 weiterentwickeln werden (diese dürften von rund 90 Millionen in 2015 bis auf 200 Millionen in 2050 ansteigen bei einem jährlichen Wachstum von

2,3 bis 2,4 Prozent). Sie gehen jedoch nicht direkt in die Berechnungen ein sondern führen an dieser Stelle lediglich zur Aussage, dass eine 100 Prozent Diffusion der Elektrofahrzeuge bis 2040 (in einem EV-Szenario der frühen Diffusion und rund 25 Prozent jährlichem Wachstum der BEV/PHEV-Neuzulassungen) oder 2050 (in einem EV Szenario der späten Diffusion und rund 18 Prozent jährlichem Wachstum der BEV/PHEV-Neuzulassungen) erreicht ist. Natürlich lassen sich mit anderen Wachstumsraten für Fahrzeugneuzulassungen auch andere Szenarien einer weniger stark oder stärker durch individuelle Fahrzeuge geprägten Mobilität annehmen (z. B. führt ein Wachstum von 4,5 Prozent bereits zu doppelt so vielen und von 5,5 Prozent zu dreimal so vielen Neuzulassungen bis 2050). Bei einer zukünftigen 100-prozentigen Diffusion der Elektromobilität wäre daher die langfristige, globale Nachfrage entsprechend an die Höhe der Neuzulassungen bzw. später des globalen Fahrzeugbestands gekoppelt. Ebenso lassen sich für andere Diffusionsraten für Elektrofahrzeuge die Ergebnisse zeitlich verschieben (vgl. frühe oder späte Diffusion). Der hier berechnete Korridor erscheint jedoch als realistisch (unter den extremeren Szenarien). Rahmensetzende Maßnahmen können hier in der Regel eine Diffusion beeinflussen.

Weiterhin wird von einem reichweiteoptimierten Szenario ausgegangen, in welchem die Batteriegröße ausgehend von heute durchschnittlich 25 kWh (vgl. Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030) sukzessive auf 60 kWh bis 2050 (globaler Durchschnitt) erhöht wird (HEV sind auch mit 1 kWh berücksichtigt, nehmen aber auf die Ergebnisse bis 2050 keinen nennenswerten Einfluss). Dies führt bis 2050 zu einer LIB Zellnachfrage jenseits der 10 TWh pro Jahr. Auch hier kann das Ergebnis zur Rohstoffnachfrage mit der Größe der eingesetzten Batterien variieren.

Mit Bezug auf die eingesetzte Zellchemie ergeben sich weitere Variablen. Auf Basis des in der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ ermittelten Einsatzes von bislang rund 70 Prozent NCA- und NMC-basierten LIB gegenüber 30 Prozent LFP-basierten LIB (ca. 25 GWh LIB-Zellen, welche in den rund 1 Million BEV/PHEV bis 2015 verbaut wurden) kann z. B. die Annahme getroffen werden, dass Nickel und Kobalt

evtl. auch zukünftig in 70 Prozent der nachgefragten Fahrzeugbatterien verbaut werden. Auch hier könnte sich das Ergebnis bei einem höheren Anteil entsprechend für diese Rohstoffe verändern.

Schließlich ändern sich auch durch den technischen Fortschritt Energiedichten (Wh/kg) der Batterien und damit der Materialeinsatz in einer Batterie. Ebenso ändern sich Zellchemien (insbesondere Co-reduzierte, Ni-reiche HE-NMC von NMC:111 zu NMC:532, 622 bis 811), mit einem Effekt auf die Rohstoffnachfrage.

Der Effekt dieses technischen Wandels soll im Folgenden anhand der Rohstoffnachfrage nach Lithium und Kobalt vertiefend analysiert werden. Hierzu werden für das reichweitenoptimierte EV-Szenario mit früher sowie später Diffusion (siehe Erklärung oben sowie die Szenarien in den Abbildungen auf Seite 26) der Rohstoffbedarf für Lithium ca. 177 g/kWh, für Kobalt ca. 467 g/kWh in NMC:111 basierten LIB sowie Lithium ca. 119 g/kWh in LFP-Batterien angenommen<sup>34</sup>. Mit der vereinfachten Annahme einer Zellnachfrage von NMC:LFP mit 70:30 lässt sich die Rohstoffnachfrage bis 2050 berechnen und kumulieren.

Weiterhin wird jeweils die Nachfrage nach Lithium und Kobalt jenseits der Fahrzeugbatterienachfrage bestimmt und ebenfalls bis 2050 kumuliert und addiert, so dass sich eine Gesamtnachfrage nach Lithium und Kobalt bis 2050 aus allen Anwendungen ergibt.<sup>35</sup>

Das Recycling der Rohstoffe wird für Lithium mit zunächst 57 Prozent angenommen und in den kommenden 10 Jahren auf 94 Prozent (für NMC-basierte LIB) bzw. 81 Prozent (für LFP-basierte LIB) erhöht. Für Kobalt wird von 94 Prozent heute und bis zu 100 Prozent in den kommenden zehn Jahren ausgegangen.<sup>36</sup> Für das Recycling von Lithium und Kobalt in anderen Anwendungen wird <1 Prozent für Lithium und 32 Prozent für Kobalt angenommen.<sup>37</sup>

Es wird hier eine durchschnittliche Lebensdauer von maximal 10 Jahren für die Fahrzeugbatterien angenommen (dies könnte sich künftig z. B. auf 15 Jahre erhöhen und die Ergebnisse für ein Recycling verzögern). Ab dem dritten Jahr können jedoch schrittweise (10 Prozent-Schritte bis zum achten Jahr, dann jeweils 20 Prozent) Fahrzeugbatterien dem Recycling zugeführt werden.

Für die Berücksichtigung des technischen Wandels werden in Variationsrechnungen nun auch die sich ändernden Rohstoffbedarfe in g/kWh berücksichtigt. Für Lithium reduziert sich der Bedarf durch eine in den kommenden 10 Jahren angenommene Verdopplung der Energiesichte entsprechend auf die Hälfte. Für Kobalt wird für diesen Zeitrahmen ein sukzessiver Wechsel über

jährliche Neuverkäufe von NMC:111 hin zu NMC:811 angenommen, wobei neben dem sich ändernden Co-Anteil zugleich auch die sich ändernde Energiedichte über eine angepasste spezifische Kapazität der Kathode berücksichtigt wird. Der Materialeinsatz für NMC-Kathoden reduziert sich damit insgesamt, der Nickelanteil steigt jedoch während sich die Mangan- und Kobalt-Anteile um den Faktor 4,4 reduzieren.

## ENTWICKLUNG DES LITHIUMBEDARFS

Die Ergebnisse für den kumulierten Lithiumbedarf zeigen nun im (reichweitenoptimierten) EV-Szenario mit später Diffusion (bis 2050) eine Lithium-Nachfrage bis über 10 Millionen Tonnen und im EV-Szenario mit früher Diffusion (bis 2040) eine Lithium-Nachfrage bis etwa 23 Millionen Tonnen. Dabei dominiert die Lithium-Nachfrage für Fahrzeugbatterien zu rund 90 Prozent die Nachfrage aus allen anderen Anwendungen.

Weiterhin zeigt sich, dass mit einer globalen Diffusion (im frühen Diffusionsszenario) dazu führt, dass der Bedarf an Primär-Lithium nicht weiter exponentiell steigt. In einem Extremfall einer globalen Diffusion könnte somit eine hohe Recyclingrate bei einer Kreislaufführung eines Rohstoffs helfen den Bedarf des Primärrohstoffs wesentlich zu reduzieren. Der Vorteil, dass anders als im Fall des Rohöls die Rohstoffe für Batterien nicht verbraucht werden, wird hieran deutlich.

Mit Blick auf die aus heutiger Sicht globalen Lithium Reserven von 13,5 Millionen Tonnen und Ressourcen von 39,5 Millionen Tonnen<sup>39</sup> ergibt sich, dass selbst im extremen Szenario der globalen und frühen Diffusion die vorhandenen geologischen Ressourcen an Lithium nicht erschöpft werden. Die Verfügbarkeit von Lithium wird zumindest aus Sicht der Ressourcen die Entwicklung der Elektromobilität ebenso wie die Nachfrage nach LIB in weiteren Anwendungen und nach Lithium in weiteren Produkten nicht behindern.

Unter Einbezug des technischen Fortschritts oder Wandels reduziert sich vielmehr in den beiden Szenarien der frühen und späten Diffusion zusätzlich der Bedarf nach Lithium auf rund 7 Millionen Tonnen (späte Diffusion) bzw. 15 Millionen Tonnen (frühe Diffusion). Das Recycling kann hier z. B. helfen sogar in der Nachfrage nach Primär-Lithium unterhalb der globalen Reserven zu bleiben.

Die Ergebnisse sollen verdeutlichen, dass intensive FuE ein ganz wesentlicher Faktor zur Reduktion eines Rohstoffbedarfs sein kann bzw. diesen weiter in die Zukunft verlagern kann. Der technische Fortschritt kann somit noch vor dem Bedarf des Recycling oder weiteren Rohstoffabbaus enorme Bedeutung haben und ggf. sogar kritische Rohstoffe oder Technologien substituieren

helfen. Im Fall der LIB ist dies ein ganz klarer Beleg für die Notwendigkeit intensiver FuE-Förderung. Darauf folgend kann aber auch des Recycling einen weiteren Stellhebel darstellen und ist ebenso wichtig rechtzeitig voranzutreiben. Erst als letztes Mittel wäre nach dem Zugang zu weiteren Reserven oder gar Ressourcen zu fragen.

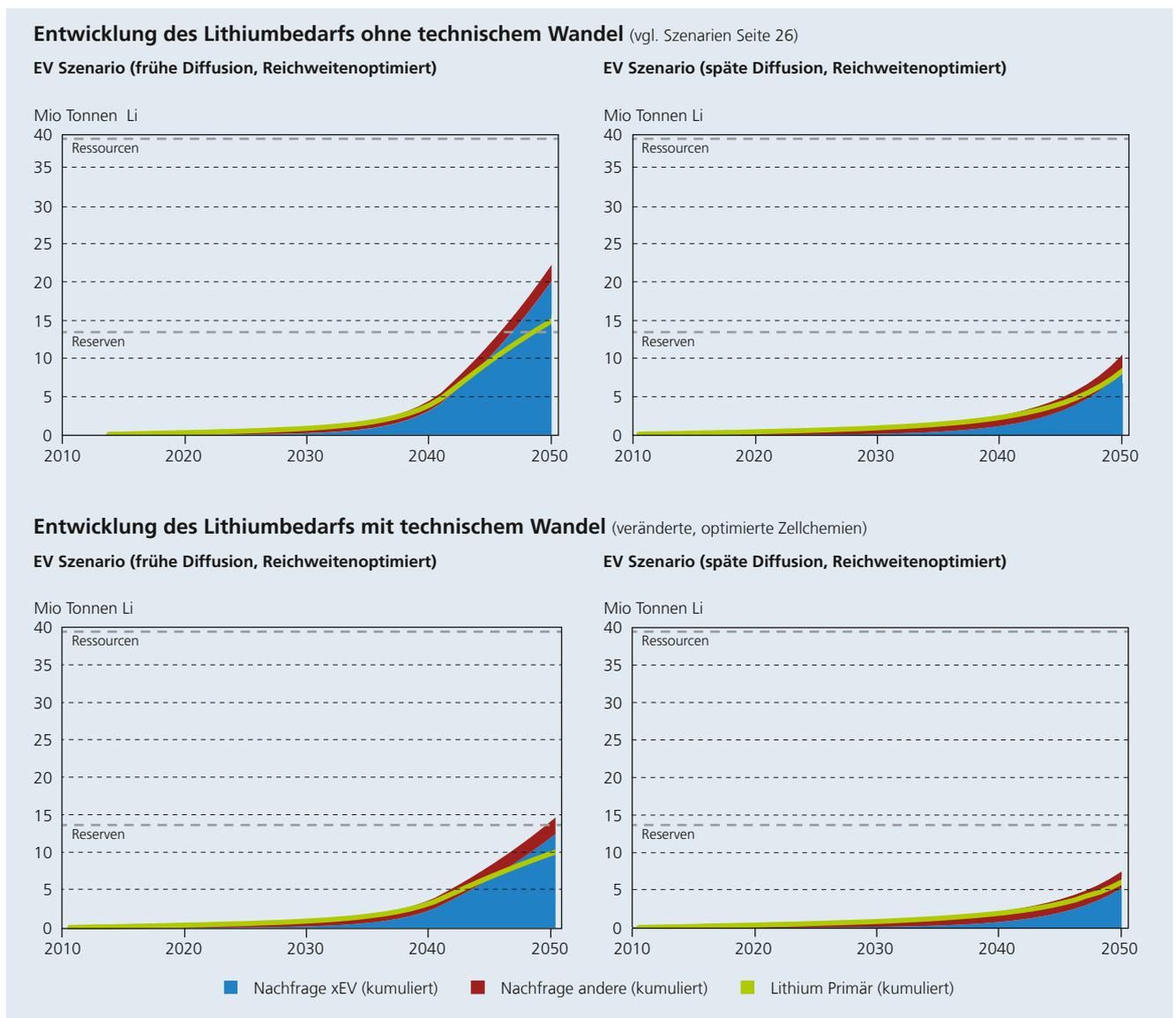
Technischer Wandel durch FuE, Produktion, Recycling, etc. müssen daher in ihrer gegenseitigen technischen, wirtschaftlichen und zeitlichen Abhängigkeit betrachtet und in einer (über eine Rohstoffstrategie hinausgehenden) Strategie unterstützt und gefördert werden.

## ENTWICKLUNG DES KOBALTBEDARFS

Dies zeigt sich noch deutlicher im Fall des Kobaltbedarfs. Die Ergebnisse für den kumulierten Kobaltbedarf zeigen im (reichweitenoptimierten) EV-Szenario mit später Diffusion (bis 2050)

eine Kobalt-Nachfrage bis nahezu 30 Millionen Tonnen und im EV-Szenario mit früher Diffusion (bis 2040) eine Kobalt-Nachfrage bis über 50 Millionen Tonnen. Dabei dominiert auch hier die Kobalt-Nachfrage für Fahrzeugbatterien im extremen Szenario die Nachfrage aus allen anderen Anwendungen. Auch hier zeigt sich wieder, dass der Bedarf an Primär-Kobalt im frühen Diffusionsszenario nicht weiter exponentiell steigt. Jedoch gelingt es selbst bei hohen Recyclingquoten nicht, die Nachfrage nach Kobalt unter den heute bekannten Reserven von 7,2 Millionen Tonnen bzw. Ressourcen (an Landes) von 25 Millionen Tonnen zu halten.

Unter Einbezug des technischen Fortschritts reduziert sich aber auch für Kobalt in den beiden Szenarien der frühen und späten Diffusion wieder der Bedarf auf unter 15 Millionen Tonnen (späte Diffusion) bzw. 20 Millionen Tonnen (frühe Diffusion). Das Recycling kann hier weiterhin helfen die Nachfrage nach Primär-Kobalt auf 10 bzw. 15 Millionen Tonnen und zumindest unterhalb der globalen Ressourcen zu bleiben.



Somit wäre auf Basis selbst dieser extremen Szenarien durch technischen Fortschritt und mit Hilfe intensiver FuE Anstrengungen, hochgradig optimierten Produktionsprozessen und Recycling bis zur Kreislaufführung des Rohstoffs Kobalt eine langfristige Auslegung der in der Roadmap diskutierten HE-NMC-basierten LIB-Zellchemie für eine globale Diffusion der Technologie darstellbar.

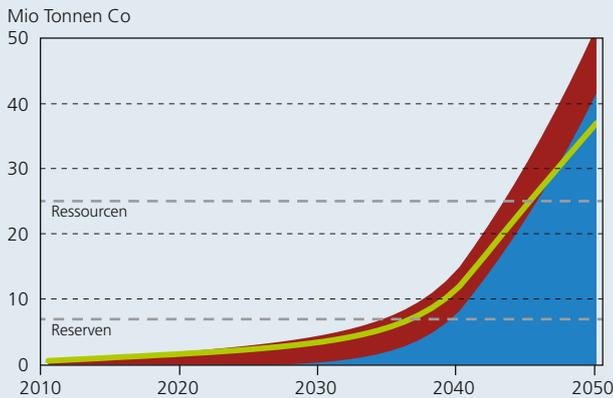
Dennoch bleiben neben den bereits diskutierten kurzfristigen Fragen der Kobalt-Produktion (also dem kurzfristigen Angebot), ganz drängende langfristig relevante Fragen wie dem Zugang z.B. zu Krisengebieten wie dem Kongo mit einem hohen Teil der Rohstoffvorkommen, Fragen des Energiebedarfs und der Umweltbilanz bei der Produktion etc. aber auch des langfristigen Rohstoffpreises selbst. Denn sollte es zu tatsächlich kritisch werdenden Rohstoffen keine Alternativen geben, wie z.B. die weitere Reduktion oder die Substitution eines Materials innerhalb einer Technologie oder den Wechsel zu einer ebenso leistungsfähigen anderen Technologie hin, dann würde eine einseitige technologische Abhängigkeit drohen.

Daher wird es weiterhin und langfristig wichtig bleiben selbst mit einer verfügbaren Technologie wie einer optimierten LIB, z.B. Post-LIB oder andere Energiespeicherlösungen als Alternative zur Verfügung zu haben. Auch bei dieser wären die entsprechenden Rohstoffe weiter im Auge zu behalten, denn ein Wechsel zu einer Li-S-Technologie könnte beispielsweise den Bedarf nach Kobalt beheben, würde jedoch wiederum einen größeren Bedarf nach Lithium bedeuten (bezogen auf 1 kWh Batteriekapazität). Auch für alternative Zukunftstechnologien wird daher eine stetige FuE enorm wichtig bleiben.

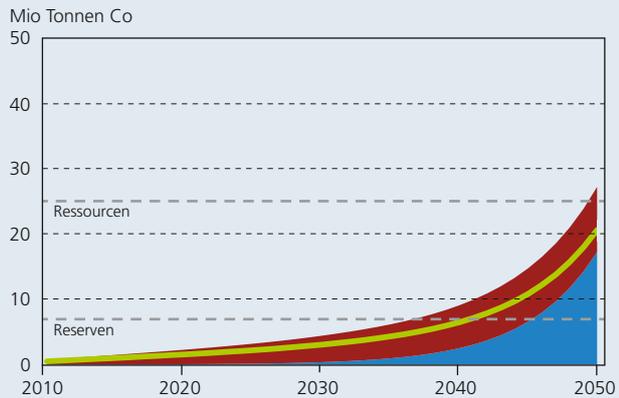
Hier nicht betrachtete bzw. weiter vertiefte Rohstoffe betreffen z.B. (Natur-)Graphit, Nickel oder Mangan, welche eine deutlich höhere Verwendung in anderen Anwendungen jenseits der LIB haben. Dennoch wären auch solche Materialien (Kobalt, Nickel und Kupfer beispielsweise auch auf Grund der angesprochenen Situation als Kuppelprodukte) in vertiefenden Analysen zu betrachten.

### Entwicklung des Kobaltbedarfs ohne technischem Wandel (vgl. Szenarien Seite 26)

#### EV Szenario (frühe Diffusion, Reichweitenoptimiert)

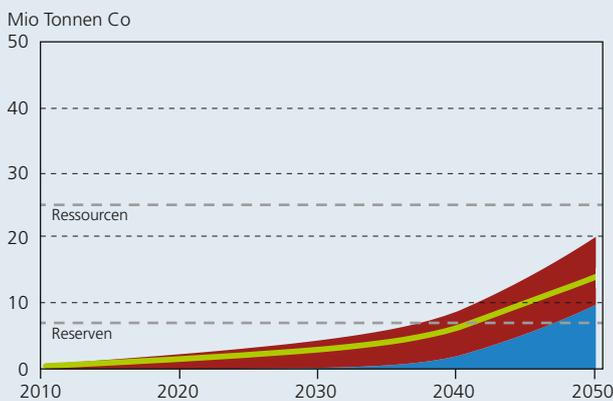


#### EV Szenario (späte Diffusion, Reichweitenoptimiert)

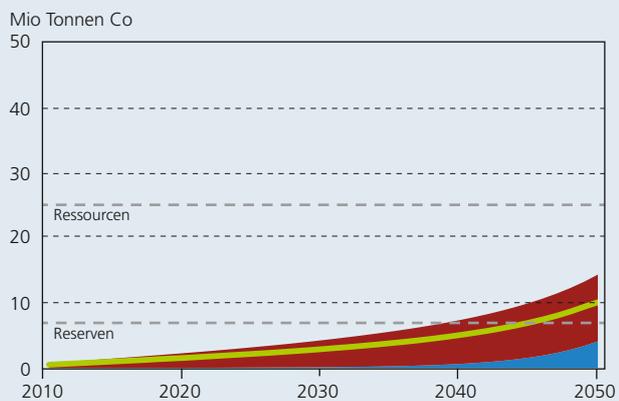


### Entwicklung des Kobaltbedarfs mit technischem Wandel (veränderte, optimierte Zellchemien)

#### EV Szenario (frühe Diffusion, Reichweitenoptimiert)



#### EV Szenario (späte Diffusion, Reichweitenoptimiert)



■ Nachfrage xEV (kumuliert) ■ Nachfrage andere (kumuliert) ■ Kobalt Primär (kumuliert)

# FAZIT UND AUSBLICK

## FAZIT

Lithium-Ionen-Batterien gelten wegen ihrer weiteren FuE-Entwicklungs-, Kostenreduktions- ebenso wie Anwendungspotenziale als eine Plattformtechnologie mit enormen Marktaussichten für die kommenden Jahrzehnte. Hinsichtlich der Wertschöpfungspotenziale ist mit einer deutlichen Verringerung des Wertschöpfungsanteils für Batteriezellen zu rechnen. Gleichzeitig wird sich aber auch der Anteil der Materialkosten im Vergleich zur reinen Zellproduktion erhöhen. Dies könnte künftig mit einer wachsenden Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien auch Material- bzw. Rohstoffpreise betreffen.

Kurz- bis mittelfristig führt dies zu Fragen, wie die deutsche Wirtschaft positioniert ist und von diesen Entwicklungen profitieren kann. So gewinnt z.B. auch die Frage nach einer deutschen oder europäischen Zellproduktion an Bedeutung. Deutschland hat einen starken Anlagen- und Maschinenbau und eine starke Chemieindustrie, welche einer Zellproduktion vorgelagerte Akteure/Zulieferer darstellen. Gleichzeitig übernehmen Automobilhersteller zunehmend selbst die Modul- und Packherstellung sowie Systemintegration in das Elektrofahrzeug, so dass die Batteriezellfertigung den einzigen nicht in Deutschland/Europa abgedeckten Teil der Wertschöpfung darstellt. Neben der sicherlich zentralen Frage wer und wo eine zukünftigen Zellproduktion aufbauen kann und wird, sollte daher noch dringender verstanden werden, welche wirtschaftlichen und strukturellen Abhängigkeiten sich für alle betroffenen Akteure entlang der Wertschöpfungskette zukünftig ergeben können und wie diese (oftmals KMU) von den entstehenden Märkten rund um die Elektromobilität und stationäre Anwendungen profitieren und sich langfristig positionieren können.

Langfristig zeigen die Szenarien einer alle Märkte durchdringenden LIB („Pro LIB-Szenario“), dass aus rohstofflicher Perspektive eine wie in der Roadmap skizzierte Diffusion in elektromobilen und stationären Märkten zwar gelingen kann, dies jedoch Anstrengungen verlangt. FuE-Fortschritte können beispielsweise einem steigenden Bedarf an Lithium und Kobalt deutlich entgegenwirken und die eingesetzte Menge in Batterien deutlich

reduzieren. Dies verschafft Zeit für die Erschließung und Nutzbarmachung weiterer Rohstoffvorkommen, aber auch für ein optimiertes Recycling und eine zukünftige Kreislaufführung. Technischer Wandel durch FuE, Produktion, Recycling etc. müssen daher in ihrer gegenseitigen technischen, wirtschaftlichen und zeitlichen Abhängigkeit betrachtet und in einer (über eine Rohstoffstrategie deutlich hinausgehenden) Strategie unterstützt und gefördert werden. Dies auch, um langfristig nicht von singulären technischen Lösungen und Materialien abzuhängen.

## AKTUALISIERUNG DER ROADMAP

Die „Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 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-libroad.php](http://www.isi.fraunhofer.de/grm-libroad.php).

Die vorliegende Gesamt-Roadmap wird durch die „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ und die „Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ ergänzt.

## BENACHBARTE PROJEKTE ZUR ELEKTROMOBILITÄT

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

# AUSGEWÄHLTE PROJEKTE

PROJEKT	ARBEITSSCHWERPUNKTE DES FRAUNHOFER ISI	FÖRDERUNG
Roadmapping-Begleitvorhaben zur Innovationsallianz LIB 2015	Roadmapping hinsichtlich der technologie- und marktseitigen Entwicklungsmöglichkeiten für Lithium-Ionen-Batterien (LIB)	BMBF
Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR)	Projekt mit Schwerpunkt Technologie-Monitoring im Rahmen der Fördermaßnahme Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)	BMBF
BEMA 2020 – Begleitmaßnahme zu Batteriematerialien für zukünftige elektromobile und stationäre Anwendungen	Fortführung des Monitoring (EMOTOR) und Roadmapping (LIB2015) zu Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität und stationäre Anwendungen, gemeinsam mit dem Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien (KLIB) und dem Münster Electrochemical Energy Technology (MEET) der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (WWU Münster)	BMBF
Themenfeld Nutzerakzeptanz	Sozialwissenschaftlich orientierte Vernetzung von Projekten zur Kundenakzeptanzforschung	BMVBS
Innovationsreport „Systembetrachtung Elektromobilität“	Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt	TAB
Regional Eco Mobility (REM) 2030	Entwicklung eines Konzeptes für und Umsetzung einer effizienten regionalen Individualmobilität für 2030	FhG, Land Baden-Württemberg
Studie „Elektromobilität weltweit: Baden-Württemberg im internationalen Vergleich“	Benchmarking der Leistungsfähigkeit von in der Elektromobilität weltweit führenden Automobil-Regionen, zum Beispiel Aichi und Tokio in Japan oder Seoul in Südkorea	e-mobil BW GmbH
Studie „Wertschöpfungspotenziale im Leichtbau und deren Bedeutung für Baden-Württemberg“	Analyse und Darstellung der Leichtbau-Wertschöpfungsketten im Land Baden-Württemberg für ausgewählte Technologien inklusive technischer und wirtschaftlicher Potenziale und Hemmnisse für die Zukunft	Leichtbau BW GmbH
Studie „Leichtbau – Trends und Zukunftsmärkte und deren Bedeutung für Baden-Württemberg“	Identifikation von Anwendungsfeldern für Leichtbautechnologien und Quantifizierung von sowohl Marktgröße als auch -wachstum bis ins Jahr 2020 anhand einer breit angelegten Patent- und Publikationsanalyse	Leichtbau BW GmbH
Technologiebericht „Nanotechnologie in den Sektoren Solarenergie und Energiespeicherung“	Analyse des Einflusses von Nanotechnologie auf die zukünftige Entwicklung von Produkten und Märkten der Solarenergie und Energiespeicherung	International Electrotechnical Commission (IEC)
Studie „Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge“	Szenarienentwicklung 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

### 18650-Batteriezellen

Mit dieser Bezeichnung sind die in der heutigen Konsum-Elektronik als Standard eingesetzten Lithium-Rundzellen gemeint, mit 18 Millimeter Durchmesser und 65 Millimeter Länge. Von diesen Zellen werden pro Jahr mehrere Milliarden Stück hergestellt, üblicherweise mit einer Kapazität von 2,2 oder 2,6 Ah und einer Spannung von 3,7 V. Der US-amerikanische Elektrofahrzeug-Hersteller Tesla Motors Inc. verbaut in seinen Elektrofahrzeugen nach wie vor Batteriesysteme, die aus 18650-Batteriezellen bestehen.

### BEV

Engl. „battery electric vehicle“, steht für ein rein batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug.

### 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.

### BEV

Engl. „battery electric vehicle“, steht für ein rein batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug.

### BHKW

Abkürzung für Blockheizkraftwerk, siehe KWK.

### 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).

### BMWi

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Im November 2015 geleitet von Bundesminister Sigmar Gabriel (SPD).

### BZ

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

### CAES

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

### CO<sub>2</sub>

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.

### C-Rate

Mit der sogenannten C-Rate kann die Größe des Lade- bzw. Entladestromes unabhängig von der Kapazität verschiedener Batteriezellen angegeben werden und ist somit ein Maß dafür, wie schnell eine Batterie ge- und entladen werden kann. Die jeweils fließenden Ströme werden mit der Bezeichnung C als Bruchteile bzw. Vielfache einer vom Hersteller spezifizierten Nennkapazität angegeben. Wird beispielsweise bei einer Zelle mit einer Nennkapazität von 1000 mAh die Entladerate 1 C gewählt, so fließt eine Stunde lang ein Strom von 1000 mA.

### 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.

### **Elektrolyse**

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

### **FCEV**

Engl. „fuel cell electric vehicle“ ist ein Fahrzeug, in welchem das Antriebssystem auf einer Brennstoffzelle basiert, welche den Elektromotor mit Energie versorgt.

### **FhG**

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

### **FuE**

Abkürzung für Forschung und Entwicklung.

### **Gesamt-Roadmap**

Eine Variante des allgemeinen Begriffs Roadmap, in der es darum geht, eine Technologie-Roadmap und eine Produkt-Roadmap so zu integrieren, dass eine Lücke zwischen dem, was eine Technologie leistet (engl. „technology push“) und dem, was von einem Markt gefordert wird (engl. „market pull“) festzustellen ist und daraus entstehende Herausforderungen identifiziert werden können.

### **Gravimetrische Energie-/Leistungsdichte**

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

### **Grid parity**

Die sogenannte Netzparität bezeichnet den Zeitpunkt, ab dem die Stromgestehungskosten pro erzeugter Kilowattstunde für aus

Erneuerbaren Energien erzeugten Strom genau so hoch sind wie die Stromgestehungskosten pro erzeugter Kilowattstunde des herkömmlichen Stroms, der bei einem Netzbetreiber eingekauft wird. Unterschieden wird die Netzparität aus Sicht eines Endverbrauchers, der die Kosten des zum Beispiel mit einer eigenen Solarenergie-Anlage produzierten Stroms mit den Kosten des von einem Energieversorgungsunternehmen zu beziehenden Stroms vergleichen muss, und die Netzparität aus Sicht eines Stromkonzerns, der die Erwerbskosten für Strom aus Erneuerbaren Energien mit den Erzeugungs- oder Erwerbskosten herkömmlichen Stroms vergleicht.

### **GW**

Abkürzung für Gigawatt.

### **GWh**

Abkürzung für Gigawattstunde.

### **H<sub>2</sub>**

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.

### **HEV**

Engl. „hybrid electric vehicle“, steht für ein Hybridelektrofahrzeug, das von mindestens einem Elektromotor und einem weiteren Energiewandler (oftmals Benzin oder Diesel) angetrieben wird.

### **HT**

Abkürzung zum Beispiel 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).

#### **kg**

Abkürzung für Kilogramm.

#### **km**

Abkürzung für Kilometer.

#### **kW**

Abkürzung für Kilowatt.

#### **kWh**

Abkürzung für Kilowattstunde.

#### **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.

#### **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).<sup>41</sup> Durch die Kopplung kann die eingesetzte Primärenergie effizienter genutzt und somit auch CO<sub>2</sub>-Emissionen gesenkt werden. Insgesamt liefert eine KWK-Anlage einen höheren Wirkungsgrad als bei getrennter Strom- und Wärmeerzeugung.

#### **l**

Abkürzung für Liter.

#### **LFP**

Engl. „lithium iron phosphate“, Lithium-Eisenphosphat (Summenformel LiFePO<sub>4</sub>) ist 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 LiCoO<sub>2</sub>. Weil sie aber eine längere Lebenszeit und höhere Leistungsdichte sowie eine verbesserte Sicherheit aufweisen, bieten sie auch Vorteile für den Einsatz in Elektrofahrzeugen.

#### **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 kalendrischen 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-Luft**

In der Lithium-Luft-Batterie wird die Kathode durch Luft ersetzt, die Anode besteht aus Lithium. Weil dieses vollständig umgesetzt werden und der für die Reaktion benötigte Sauerstoff aus der Umgebungsluft kommen kann, entscheidet allein die Größe der Anode über die Kapazität der Batterie-Zelle. Aus diesem

Grund liegt zumindest die theoretisch erreichbare Energiedichte über der aller anderen Batterietechnologien. Allerdings steht noch offen, ob und v. a. wann Lithium-Luft-Batterien als wieder-aufladbare Systeme für den Einsatz in der stationären Energiespeicherung realisiert werden können.

#### **Li-Polymer**

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

#### **Li-S**

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

#### **LKW**

Abkürzung für Lastkraftwagen.

#### **LMO**

Engl. „lithium manganese oxide“, Lithium-Manganoxid (Summenformel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) ist ein Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien. Vorteile existieren hinsichtlich der Kosten sowie der höheren Sicherheit. Nachteile bestehen bei der Lebensdauer.

#### **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 Zyklfestigkeit und eine lange kalendarische Lebensdauer benötigen. LTO-basierte Batteriezellen haben eine geringere Zellspannung, was ihre Sicherheit erhöht. Die Batterien sind schnell aufladbar und können dank ihrer chemischen Stabilität in einer größeren Temperatur-Bandbreite betrieben werden. Ihre Energiedichte ist niedriger als bei anderen Lithium-Ionen-Batterien, ihre Leistungsdichte je nach Kathodenmaterial auch besser. Als weiterer Nachteil gelten die materialbedingt hohen Kosten.

#### **MW**

Abkürzung für Megawatt.

#### **MWh**

Abkürzung für Megawattstunde.

#### **NaNiCl<sub>2</sub>**

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

#### **Netznutzungsentgelte**

Netzentgelte sind von den Netznutzern für die Inanspruchnahme des Stromnetzes bzw. zur Durchleitung von Strom zu entrichten.<sup>42</sup> 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 zum Beispiel in der Industrie bezahlen sie direkt.<sup>43</sup> 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.

#### **NiCd**

Nickel-Cadmium-Akkumulatoren, in denen Elektroden aus eben den 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 Entladespannung und können relativ schnell geladen werden.

### **NMC:XYZ**

Innerhalb der Summenformel  $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$  für NMC (siehe NMC) gelten verschiedene Zusammensetzungen von Nickel, Kobalt und Mangan als besonders vielversprechend für den Einsatz in Lithium-Ionen-Batterien (siehe LIB): Von NMC:111 (mit jeweils gleichen Anteilen) über NMC:532 (mit 5 Anteilen Nickel, 3 Anteilen Kobalt und 2 Anteilen Mangan), NMC:622 (mit 6 Anteilen Nickel und jeweils gleichen Anteilen für Kobalt und Mangan) bis hin zu NMC:811 (mit 8 Anteilen Nickel und jeweils gleichen Anteilen für Kobalt und Mangan).

### **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-**

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

### **Off-Grid-PV**

Off-Grid-Photovoltaik wird oft als eine Inselanlage betrieben, die sich von Inselnetzen allerdings durch ihren Umfang unterscheidet (siehe Inselnetze). Sie ist nicht an ein ggf. landesweites, öffentliches Stromnetz angeschlossen bzw. wird vor allem dort eingesetzt, wo der Anschluss an das jeweils übergeordnete Stromnetz nicht möglich oder nicht wirtschaftlich ist. Off-Grid-Photovoltaik funktioniert daher nur mit einem (oder mehreren) dem Bedarf entsprechend dimensionierten Energiespeichern.

### **On-Grid-PV**

On-Grid-Photovoltaik ist an ein ggf. landesweites, öffentliches Stromnetz angeschlossen bzw. wird vor allem dort eingesetzt, wo der Anschluss an das jeweils übergeordnete Stromnetz möglich bzw. wirtschaftlich ist. On-Grid-Photovoltaik funktioniert auch ohne einen (oder mehrere) dem Bedarf entsprechend dimensionierten Energiespeicher, wenn der Strom nicht zur Eigenverbrauchsoptimierung eingesetzt und direkt ins Stromnetz eingespeist werden soll.

### **Pb**

Blei-Säure-Akkumulatoren mit Elektroden aus Blei und Bleiodioxid 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 v.a. in der Nacht. Wenn die Lastnachfrage dann wieder ansteigt und die Energienutzungspreise wieder höher liegen, werden die Energiespeicher entladen und das Stromnetz bzw. die Erzeugungskapazität kann entlastet werden. Die erzielte Preisdifferenz abzüglich der Speicherverluste und der variablen Betriebskosten stellt die Gewinnmarge des Energiespeicher-betreibenden Unternehmens dar, aus der auch die Investitionen refinanziert werden können.<sup>44</sup>

### **PEM-FC**

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

### **PHEV**

Engl. „plug-in hybrid electric vehicle“, steht für ein plug-in-hybrid-elektrisches Fahrzeug, ist ein Kraftfahrzeug mit Hybridantrieb, dessen Batterie zusätzlich über das Stromnetz extern geladen werden kann. Weil es oft eine größere Batterie aufweist als ein Hybridelektrofahrzeug, stellt es eine Art Mischform zwischen Letzterem und einem BEV dar.

## **PHES**

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

## **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.

## **PV**

Abkürzung für Photovoltaik.

## **REFC**

Engl. „range-extended fuel cell (electric vehicle)“ ist ein Fahrzeug, in welchem das Antriebssystem auf einer Brennstoffzelle basiert (siehe FCEV) und das über ein Aggregat zur Reichweitenverlängerung verfügt – am häufigsten eingesetzt werden Verbrennungsmotoren, welche einen Generator antreiben, der wiederum Akkumulator und Elektromotor mit Strom versorgt.

## **RFB**

Abkürzung für Redox-Flow-Batterie, ein Akkumulatorenkonzept, welches auf der Reduktion und Oxidation von umgepumpten Elektrolytlösungen aus Vorratstanks 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.

## **Second use**

Engl. „Zweitverwendung“, synonym auch „Second life“, engl. „zweites Leben“. Neben dem Recycling haben diese Konzepte für am Ende der Hauptnutzungsdauer zum Beispiel in der Elektromobilität angekommene Lithium-Ionen-Batterien sowohl ein großes ökologisches als auch ein ökonomisches Potenzial.<sup>45</sup> Derartige Batterien haben in der Regel noch ausreichende Kapazitäten für Zweitanwendungen mit geringeren Anforderungen zum Beispiel in der stationären Energiespeicherung und können dadurch je nach Anwendung eine Lebensdauer von zwanzig Jahren und mehr erreichen. Durch die Zweitvermarktung der Batterien kann ihre Ökobilanz verbessert und es können zusätzliche Einnahmen zur Verbesserung ihrer Wirtschaftlichkeit generiert werden.

## **Si/C-Komposite**

Silicium-Kohlenstoff-Komposite als Anodenmaterialien gelten als vielversprechend für den Einsatz in Lithium-Ionen-Batterien (siehe LIB) und stellen eine Kombination von Graphit mit Anteilen von Silizium dar.

## **Smart Grid**

Engl. „intelligentes Netz“, wodurch ein Stromnetz bezeichnet wird, das auf kosteneffiziente Weise das Verhalten und die Handlungen aller daran angeschlossenen Nutzer – einschließlich Erzeuger, Verbraucher und Akteure, die sowohl Erzeuger als auch Verbraucher sind – integrieren kann, damit ein wirtschaftlich effizientes und nachhaltiges Stromnetz mit geringen Verlusten, hoher Qualität, großer Versorgungssicherheit und hoher technischer Sicherheit gewährleistet wird.<sup>46</sup>

## **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.<sup>47</sup> In Zeiten von hoher Stromnachfrage und/oder -preisen könnte das Gas wieder in elektrische Energie bzw. Strom umgewandelt werden.

#### **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.

#### **TW**

Abkürzung für Terawatt.

#### **TWh**

Abkürzung für Terawattstunde.

#### **USV**

Abkürzung für Unterbrechungsfreie Stromversorgung. USV beziehen ihre Energie aus Akkumulatoren und werden zum Schutz hochsensibler technischer Systeme wie Großrechner, Server und Telefonanlagen eingesetzt.<sup>48</sup> 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.

#### **V2G**

Abkürzung für „vehicle to grid“, engl. „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.

#### **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, 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  $\text{NaNiCl}_2$

#### **Zn/Br-RFB**

Die Zink-Brom-RFB ist der Hauptvertreter der Spezialform Hybrid-Flow-Batterien.<sup>49</sup> 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 somit nicht vollständig gegeben, da die Energiedichte auch vom Volumen der gebildeten Zink-Schicht abhängt. Auch aufgrund der kompakten Metallelektrode ergeben sich relativ hohe Energiedichten, allerdings ist die Verwendung von Brom aufgrund seiner Toxizität nicht unproblematisch. Die Verwendung von Komplexbildnern kann diese Problematik lindern. Weitere Probleme, die bei diesem Batteriesystem auftreten, sind kurze Lebensdauern, geringe Energiewirkungsgrade von ungefähr 70 Prozent und die Bildung von Zink-Dendriten. Diese können zur Verstopfung der Kanäle und zu Kurzschlussbildung führen, und der Wirkungsgrad sinkt.

## QUELLEN

<sup>1</sup> International Energy Agency (IEA, 2015): Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource, Link: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>2</sup> Wietschel et al. (2015): Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden – Seite 245ff.

<sup>3</sup> International Energy Agency (IEA, 2015): Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource, Link: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>4</sup> Mit Hilfe einer dieselbetriebenen Brennstoffzellen-APU (engl. „auxiliary power unit“, zu deutsch etwa Hilfstriebwerk) kann Diesel sehr effizient in Strom umgewandelt werden. Der eigentliche Generator kann dadurch bei der Stromerzeugung entlastet und Verbrauch sowie Emissionen gemindert werden.

<sup>5</sup> International Energy Agency (IEA, 2015): Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource, Link: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>6</sup> Statista GmbH (2015): Projected worldwide sales of electric bicycles in 2012 and 2018 (in million units). Online-Ressource, Link: <http://www.statista.com/statistics/255653/worldwide-sales-of-electric-bicycles/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>7</sup> Electric Battery Bicycle Company (2015): Electric Bikes Worldwide Reports – Revealing the Revolution in Two Wheel Mobility. Online-Ressource, Link: <http://www.ebwr.com/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>8</sup> Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, 2013): Neuigkeiten – Zahlen – Daten – Fakten: Deutscher Fahrradmarkt 2014 – Pedelecs bauen ihren Anteil weiter aus. Online-Ressource, Link: <http://www.nationaler-radverkehrsplan.de/neuigkeiten/news.php?id=4627>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>9</sup> International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA, 2015): 2015 Q2 Production Statistics. Online-Ressource, Link: <http://www.oica.net/category/production-statistics/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>10</sup> Wikimedia Foundation Inc. (2015): Liste von Elektro-Nutzfahrzeugen und Elektro-Nutzfahrzeug-Prototypen. Online-Ressource, Link: [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_von\\_Elektro-Nutzfahrzeugen\\_und\\_Elektro-Nutzfahrzeug-Prototypen#Derzeit\\_in\\_Produktion\\_befindliche.2C\\_im\\_Handel\\_erh.C3.A4ltliche\\_Elektro-LKWs.2C\\_-Omnibusse\\_und\\_-Kleintransporter](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Elektro-Nutzfahrzeugen_und_Elektro-Nutzfahrzeug-Prototypen#Derzeit_in_Produktion_befindliche.2C_im_Handel_erh.C3.A4ltliche_Elektro-LKWs.2C_-Omnibusse_und_-Kleintransporter), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>11</sup> Spiegel Online GmbH (2015): Oberleitungs-Lkw: Aus der Luft gegriffen. Online-Ressource, Link: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/e-highway-schweden-und-usa-testen-oberleitungs-lkwa-1037691.html>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>12</sup> avicenne ENERGY (2015): Lithium-Ion Battery Market Expansion Beyond Consumer and Automotive. Online-Ressource (Registrierung erforderlich), Link: [http://www.avicenne.com/articles\\_energy.php](http://www.avicenne.com/articles_energy.php), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>13</sup> Sandia Corporation (2015): DOE Global Energy Storage Database – Office of Electricity Delivery & Energy Reliability. Online-Ressource, Link: <http://www.energystorageexchange.org/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>14</sup> avicenne ENERGY (2013): The worldwide battery market 2012 – 2025. Online-Ressource (Registrierung erforderlich), Link: [http://www.avicenne.com/articles\\_energy.php](http://www.avicenne.com/articles_energy.php), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

• SaftSA(2013-1): Saftbatteriesystemsfor surfaceships. Online-Ressource, Link: [http://www.s-lass.com/en/Documents/Presentationer%20Roadshow%20maj%202013/3\\_SAFT%20Battery%20System%20for%20Surface%20Ships%20roadshow%20rev3.pdf](http://www.s-lass.com/en/Documents/Presentationer%20Roadshow%20maj%202013/3_SAFT%20Battery%20System%20for%20Surface%20Ships%20roadshow%20rev3.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

- Saft SA (2013-2): Saft – Critical power for medical applications. Online-Ressource, Link: [http://www.saftbatteries.com/force\\_download/Medical\\_brochure.pdf](http://www.saftbatteries.com/force_download/Medical_brochure.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- avicenne ENERGY (2014): The rechargeable battery market. Online-Ressource (Registrierung erforderlich), Link: [http://www.avicenne.com/articles\\_energy.php](http://www.avicenne.com/articles_energy.php), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- EndGame360 Inc./CheatSheet.com (2014): 5 Electric Motorcycles That Go the Distance (Literally). Online-Ressource, Link: <http://www.cheatsheet.com/automobiles/5-electric-motorcycles-with-over-130-miles-of-range.html?a=viewall>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Global Information, Inc. (2014): Market Research Report – 195715 – Cathode Material for Li-ion Secondary battery Technology Trend and Market Forecast (2012~2018). Online-Ressource, Link: <http://www.giiresearch.com/report/sne195715-cathode-material-li-ion-secondary-battery.html>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- ALTe Technologies (2015): News & Media – Latest News – Electric Drive Trucks and Buses. Online-Ressource, Link: <http://www.altellc.com/blog/2015/02/electric-drive-trucks-and-buses>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- avicenne ENERGY (2015): Lithium-Ion Battery Market Expansion Beyond Consumer and Automotive. Online-Ressource (Registrierung erforderlich), Link: [http://www.avicenne.com/articles\\_energy.php](http://www.avicenne.com/articles_energy.php), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Bobit Business Media/World Truck Online (2015): Commercial Sales for Electric Trucks and Buses to Reach 805,000 by 2023. Online-Ressource, Link: <http://www.worktruckonline.com/channel/utility/news/story/2015/04/commercial-sales-for-electric-trucks-and-buses-to-reach-805-000-by-2023.aspx>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- BYD Company Ltd. (2015): 2.5 Ton Counterbalance ECB25. Online-Ressource, Link: <http://bydforklift.com/index.php/products/counterbalance-4-wheel/25t.html>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Copyright Zero Motorcycles, Inc./ZERO Motorcycles (2015): 2016 ZERO S. Online-Ressource, Link: <http://www.zeromotorcycles.com/zero-s/specs.php>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Electric Battery Bicycle Company (2015): Electric Bikes Worldwide Reports – Revealing the Revolution in Two Wheel Mobility. Online-Ressource, Link: <http://www.ebwr.com/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- EVObsession (2015): Electric Truck & Bus Sales To Boom. Online-Ressource, Link: <http://evobsession.com/electric-truck-bus-sales-boom/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Inventus Power (2015): Seismic Rechargeable Power Solutions – Extreme Batteries optimized for extreme environments. Online-Ressource, Link: <http://www.iccnexergy.com/battery-systems/seismic-rechargeable-power-solutions/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- McDowall et al., Battcon – International Stationary Battery Conference (Battcon, 2010): Sophistication versus Simplicity – System Design Considerations for Lithium-Ion Batteries in Standby Power Applications. Online-Ressource, Link: [http://www.battcon.com/PapersFinal2010/McDowallPaper2010Final\\_6.pdf](http://www.battcon.com/PapersFinal2010/McDowallPaper2010Final_6.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- MIL Power Ltd. (2015): MPL MIL Power Ltd. – Delivering Battery Performance. Online-Ressource, Link: <http://www.milpower.co.uk/seismic-batteries/index.html>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Navigant Consulting, Inc. (2015): Electric Motorcycles and Scooters – Market Drivers and Barriers, Technology Issues, Key Industry Players, and Global Demand Forecasts. Online-Ressource, Link: <http://www.navigantresearch.com/research/electric-motorcycles-and-scooters>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- PowerTech Systems (2015): 12V Lithium battery pack “Plug & Play” – PowerBrick® 12V. Online-Ressource, Link: <http://www.powertechsystems.eu/en/li-ion-products/12v-lithium-battery-pack-powerbrick/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Saft SA (2015-1): MP & Small VL. Online-Ressource, Link: <http://www.saftbatteries.com/battery-search/mp-small-vl>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Saft SA (2015-2): 12V Super-Phosphate Battery. Online-Ressource, Link: <http://www.saftbatteries.com/battery-search/12v-super-phosphate-battery>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Saft SA (2015-3): Evolion® – Our proven ultra-compact solution. Online-Ressource, Link: <http://www.saftbatteries.com/battery-search/evolion%C2%AE>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Saft SA (2015-4): Tel.x – Telecom – Guaranteed Power Continuity for Remote or Hard to Access Installations. Online-Ressource, Link: <http://www.saftbatteries.com/battery-search/telx-telecom>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- SAMSUNG SDI Co., Ltd. (2015-1): Energy Storage System – From Kilowatt to megawatt, samsung has a solution. Online-Ressource, Link: <http://www.samsungsdi.com/ess/overview>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- SAMSUNG SDI Co., Ltd. (2015-2): Power Tool – Make power tool even more powerful with Samsung SDI. Online-Ressource, Link: <http://www.samsungsdi.com/lithium-ion-battery/power-tool>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- SAMSUNG SDI Co., Ltd. (2015-3): E-Bike – Samsung SDI, the Total Battery Solution Provider. Online-Ressource, Link: <http://www.samsungsdi.com/lithium-ion-battery/e-bike>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Statista GmbH (2015): Projected worldwide sales of electric bicycles in 2012 and 2018 (in million units). Online-Ressource, Link: <http://www.statista.com/statistics/255653/worldwide-sales-of-electric-bicycles/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

- <sup>15</sup> Anderman/Advanced Automotive Batteries (AAB, 2013): Assessing the Future of Hybrid and Electric Vehicles: The xEV Industry Insider Report (2nd Edition). Online-Ressource (Studie zum Kauf, Stand: Oktober 2015), Link: <http://www.totalbatteryconsulting.com/industry-reports/xEV-report/ordering-information.html>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- avicenne ENERGY (Pillot 2013): The worldwide battery market 2012 – 2025. Online-Ressource (Registrierung erforderlich), Link: [http://www.avicenne.com/articles\\_energy.php](http://www.avicenne.com/articles_energy.php), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - BCC Research Report (BCC 2015): Link: <http://www.business-green.com/bg/news/2391991/electric-vehicle-battery-market-set-to-top-usd21bn-by-2019> Link: <http://www.prnewswire.com/news-releases/large-and-advanced-battery-technology-and-markets-300095829.html>
  - Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI, 2012): Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Online-Ressource, Link: [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/LIB\\_Broschueren/prm-libroad.php](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/LIB_Broschueren/prm-libroad.php), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - Frost & Sullivan (2010): World Lithium-ion Battery Market. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://www.frost.com/prod/servlet/report-brochure.pag?id=N76F-27-00-00-00>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - Frost & Sullivan (2012): Global Hybrid Electric and Electric Vehicle Lithium-ion Battery Market. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://www.frost.com/sublib/display-report.do?id=N9E7-01-00-00-00>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - Frost & Sullivan (2014-1): Analysis of the Global Lithium-ion Battery Market: Growth Opportunities and Market Outlook. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://www.frost.com/sublib/display-report.do?id=ND02-01-00-00-00>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - Frost & Sullivan (2014-2): Global Medical Battery Market – Untapped Potential in the Asia-Pacific Region for Wireless Medical Devices Boosts Demand. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://www.frost.com/sublib/display-report.do?id=MA32-01-00-00-00&bdata=aHR0cDovL3d3dy5mcm9zdC5jb20vc3VibGliL3N1YnNjcmlwdGlvb1p1bmlleC5kbz9zdWJzY3JpcHRpb25JZD05MjExJnBhZ2U9MkI%2BQEQHdHRCmllcywgSW5kdXN0cnkgUmVzZWYy2gsIEsb2JhbEB%2BQDE0NTAwMDUzNTQ1NTE%3D&subscriptionId=9211>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - GlobalData (2013): Electric Vehicle Battery Market – Market Size, Investment Analysis, and Forecast to 2020. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://store.globaldata.com/market-reports/power/electric-vehicle-battery-market-market-size-investment-analysis-and-forecast-to-2020#.Vm1UM2fL0ic>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - IHS Inc. (2011): Rechargeable Battery Special Report. Online-Ressource, Link: <https://technology.ihs.com/api/binary/377926>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - Lux Research (Lux 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](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
  - Navigant Consulting Inc. (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
  - Navigant Consulting, Inc. (2014): Electric Vehicle Batteries – Lithium Ion Batteries for Hybrid, Plug-In Hybrid, and Battery Electric Vehicles: Global Market Analysis and Forecasts. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://www.navigantresearch.com/research/electric-vehicle-batteries>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - Navigant Consulting, Inc (Navigant 2015): Energy Storage for Renewable Integration. Link: <http://energystorage.org/news/esa-news/energy-storage-renewables-integration-burgeoning-market>
  - Statista GmbH (2015): Projected global lithium battery market size from 2011 to 2020 (in billion U.S. dollars). Online-Ressource, Link: <http://www.statista.com/statistics/235316/global-lithium-battery-market/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - Transparency Market Research (TMR, 2013): Global Lithium Ion Battery Market (Cathode, Anode, and Electrolytic solution) Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2013 –2019. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://www.transparencymarketresearch.com/lithium-ion-battery-market.html>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
  - Yano Research Institute Ltd. (2011): Lithium-ion Battery Market: Cell & Components 2011. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: [http://www.yanoresearch.com/market\\_reports/C53102500?english=1](http://www.yanoresearch.com/market_reports/C53102500?english=1), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>16</sup> Anderman/Advanced Automotive Batteries (AAB, 2013): Assessing the Future of Hybrid and Electric Vehicles: The xEV Industry Insider Report (2nd Edition). Online-Ressource (Studie zum Kauf, Stand: Oktober 2015), Link: <http://www.totalbatteryconsulting.com/industry-reports/xEV-report/ordering-information.html>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Weitere Informationen sind in der Produkt- und Gesamt-Roadmap „Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ von Thielmann et al./Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI, 2015) zu finden.

- <sup>17</sup> Weitere Informationen sind in der „Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ von Thielmann et al./Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI, 2015) zu finden.
- <sup>18</sup> avicenne ENERGY (2015): Lithium-Ion Battery Market Expansion Beyond Consumer and Automotive. Online-Ressource (Registrierung erforderlich), Link: [http://www.avicenne.com/articles\\_energy.php](http://www.avicenne.com/articles_energy.php), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>19</sup> Wietschel et al. (2015): Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden – Seite 157ff.
- <sup>20</sup> avicenne ENERGY (2015): Lithium-Ion Battery Market Expansion Beyond Consumer and Automotive. Online-Ressource (Registrierung erforderlich), Link: [http://www.avicenne.com/articles\\_energy.php](http://www.avicenne.com/articles_energy.php), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>21</sup> Wietschel et al./etv Energieverlag GmbH (2008): Quo vadis Elektromobilität? (Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 58. Jahrgang, Heft 12, Seiten 8-15)
- <sup>22</sup> European Commission (2015): Reducing CO2 emissions from passenger cars – Policy. Online-Ressource, Link: [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>23</sup> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, 2015): Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO<sub>2</sub> - Emissionen von Personenkraftwagen. Online-Ressource, Link: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu\\_verordnung\\_co2\\_emissionen\\_pkw.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>24</sup> California Environmental Protection Agency (CEPA, 2015): Zero Emission Vehicle (ZEV) Program. Online-Ressource, Link: <http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevprog.htm>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>25</sup> European Commission (2015): Reducing CO2 emissions from passenger cars – Policy. Online-Ressource, Link: [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>26</sup> 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](http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/Speicherprogramm_Hintergrundpapier.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- RWTH Aachen/ISEA im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, 2013): Marktanreizprogramm für dezentrale Speicher insbesondere für PV-Strom. Online-Ressource (Studie über das Informationsportal Erneuerbare Energien des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)), Link: [http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Gutachten/kurzgutachten\\_marktanreizprogramm\\_bf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Gutachten/kurzgutachten_marktanreizprogramm_bf.pdf?__blob=publicationFile&v=2), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, 2015): Marktanreizprogramm für dezentrale Stromspeicher für PV-Strom. Online-Ressource, Link: [http://www.etsp.de/pdf-files/Marktanreizprogramm\\_Solarspeichersysteme.pdf](http://www.etsp.de/pdf-files/Marktanreizprogramm_Solarspeichersysteme.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>27</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2014): Bekanntmachung Forschungsförderung im 6. Energieforschungsprogramm „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung – Vom 8. Dezember 2014. Online-Ressource, Link: <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/B/bekanntmachung-forschungsfoerderung-im-6-energie-forschungsprogramm,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>28</sup> 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 13.12.2015
- <sup>29</sup> Renard, International Conference on Olivines for Rechargeable Batteries (OREBA 1.0, 2014): 2020 cathode materials cost competition for large scale applications and promising LFP best-in-class performer in term of price per kWh. Online-Ressource, Link: [https://www.eiseverywhere.com/file\\_uploads/eb9b04cd75ee9da4619308dffd78760\\_O-8.01RenardFabrice.pdf](https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/eb9b04cd75ee9da4619308dffd78760_O-8.01RenardFabrice.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- Cobalt Development Institute (CDI, 2015): 10 Cobalt Supply & Demand 2014. Online-Ressource, Link: <http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/Cobalt%20Facts%20-%20Supply%20%20Demand%20-%202014.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>30</sup> Renard, International Conference on Olivines for Rechargeable Batteries (OREBA 1.0, 2014): 2020 cathode materials cost competition for large scale applications and promising LFP best-in-class performer in term of price per kWh. Online-Ressource, Link: [https://www.eiseverywhere.com/file\\_uploads/eb9b04cd75ee9da4619308dffd78760\\_O-8.01RenardFabrice.pdf](https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/eb9b04cd75ee9da4619308dffd78760_O-8.01RenardFabrice.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>31</sup> United States Geological Survey (USGS, 2015): Cobalt. Online-Ressource, Link: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/mcs-2015-cobal.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>32</sup> Cobalt Development Institute (CDI, 2015): 10 Cobalt Supply & Demand 2014. Online-Ressource, Link: <http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/Cobalt%20Facts%20-%20Supply%20%20Demand%20-%202014.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>33</sup> Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI, 2009): Lithium für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Online-Ressource, Link: [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Lithium\\_fuer\\_Zukunftstechnologien.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Lithium_fuer_Zukunftstechnologien.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

• Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcenverfügbarkeit im Rahmen der durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderten Projekte LithoRec und LiBRi (BMUB, 2011): Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen – Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt (Abschlussbericht). Online-Ressource (Studie über das Informationsportal Erneuerbar mobil des BMUB), Link: <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/batterierecycling/abschlussberichte-recycling/bericht-ressourcenverfuegbarkeit-projektuebergreifend.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

• Reuter et al., Conference on Future Automotive Technology (CoFAT, 2014): Future Ressource Availability for the Production of Lithium-Ion Vehicle Batteries. Online-Ressource, Link: [https://www.researchgate.net/profile/Benjamin\\_Reuter/publication/263888647\\_COFAT\\_2014\\_\\_Future\\_Resource\\_Availability\\_for\\_the\\_Production\\_of\\_Lithium-Ion\\_Vehicle\\_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Benjamin_Reuter/publication/263888647_COFAT_2014__Future_Resource_Availability_for_the_Production_of_Lithium-Ion_Vehicle_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

• Reuter et al., Conference on Future Automotive Technology (CoFAT, 2014): Future Ressource Availability for the Production of Lithium-Ion Vehicle Batteries. Online-Ressource, Link: [https://www.researchgate.net/profile/Benjamin\\_Reuter/publication/263888647\\_COFAT\\_2014\\_\\_Future\\_Resource\\_Availability\\_for\\_the\\_Production\\_of\\_Lithium-Ion\\_Vehicle\\_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Benjamin_Reuter/publication/263888647_COFAT_2014__Future_Resource_Availability_for_the_Production_of_Lithium-Ion_Vehicle_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>34</sup> Reuter et al., Conference on Future Automotive Technology (CoFAT, 2014): Future Ressource Availability for the Production of Lithium-Ion Vehicle Batteries. Online-Ressource, Link: [https://www.researchgate.net/profile/Benjamin\\_Reuter/publication/263888647\\_COFAT\\_2014\\_\\_Future\\_Resource\\_Availability\\_for\\_the\\_Production\\_of\\_Lithium-Ion\\_Vehicle\\_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Benjamin_Reuter/publication/263888647_COFAT_2014__Future_Resource_Availability_for_the_Production_of_Lithium-Ion_Vehicle_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>35</sup> Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI, 2009): Lithium für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Online-Ressource, Link: [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Lithium\\_fuer\\_Zukunftstechnologien.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Lithium_fuer_Zukunftstechnologien.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

• Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcenverfügbarkeit im Rahmen der durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderten Projekte LithoRec und LiBRi (BMUB, 2011): Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen – Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt (Abschlussbericht). Online-Ressource (Studie über das Informationsportal Erneuerbar mobil des BMUB), Link: <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/batterierecycling/abschlussberichte-recycling/bericht-ressourcenverfuegbarkeit-projektuebergreifend.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

• Reuter et al., Conference on Future Automotive Technology (CoFAT, 2014): Future Ressource Availability for the Production of Lithium-Ion Vehicle Batteries. Online-Ressource, Link: [https://www.researchgate.net/profile/Benjamin\\_Reuter/publication/263888647\\_COFAT\\_2014\\_\\_Future\\_Resource\\_Availability\\_for\\_the\\_Production\\_of\\_Lithium-Ion\\_Vehicle\\_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Benjamin_Reuter/publication/263888647_COFAT_2014__Future_Resource_Availability_for_the_Production_of_Lithium-Ion_Vehicle_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>36</sup> Öko-Institut e.V. – Institut für angewandte Ökologie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUB, 2011): Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec). Online-Ressource, Link: <http://www.oeko.de/oekodoc/1500/2011-068-de.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

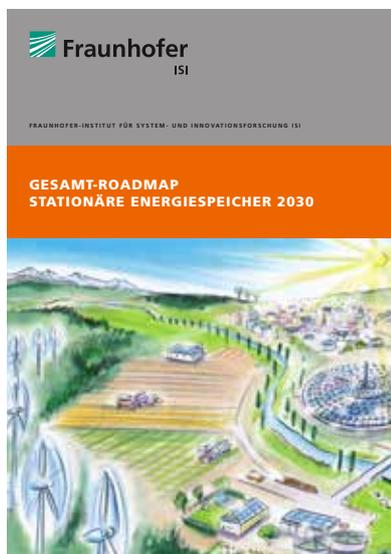
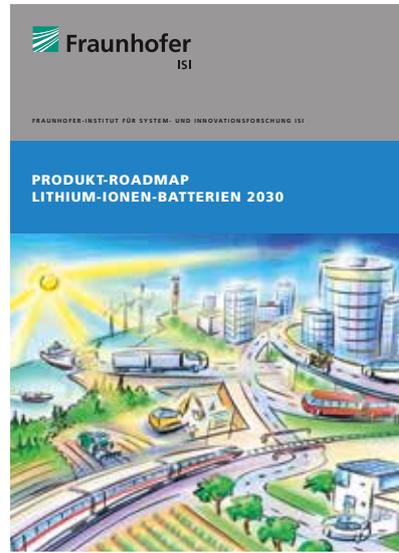
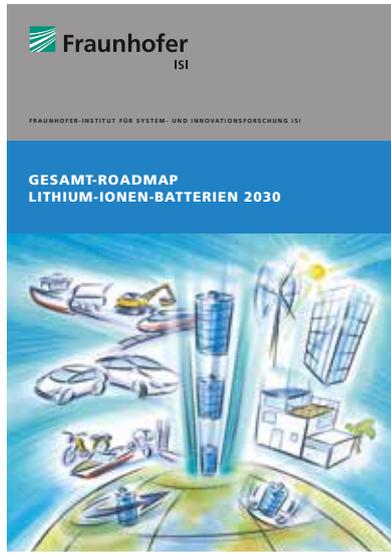
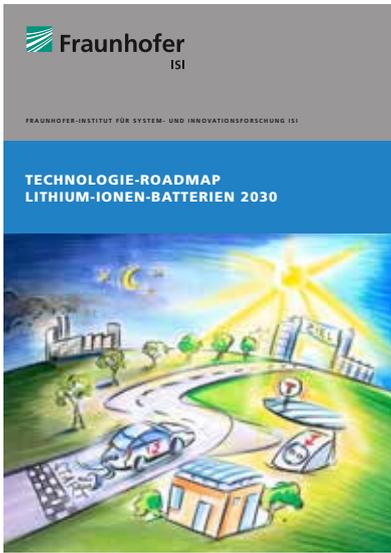
• Öko-Institut e.V. – Institut für angewandte Ökologie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUB, 2011): Verbundprojekt: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRi – Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren (Endbericht). Online-Ressource, Link: <http://www.oeko.de/oekodoc/1499/2011-068-de.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>37</sup> Reuter et al., Conference on Future Automotive Technology (CoFAT, 2014): Future Ressource Availability for the Production of Lithium-Ion Vehicle Batteries. Online-Ressource, Link: [https://www.researchgate.net/profile/Benjamin\\_Reuter/publication/263888647\\_COFAT\\_2014\\_\\_Future\\_Resource\\_Availability\\_for\\_the\\_Production\\_of\\_Lithium-Ion\\_Vehicle\\_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Benjamin_Reuter/publication/263888647_COFAT_2014__Future_Resource_Availability_for_the_Production_of_Lithium-Ion_Vehicle_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015

<sup>38</sup> EC Power, LLC (2014): Virtual Cell Design and System Sizing with Ni-rich High Capacity Cathode Active Materials. Online-Ressource, Link: <http://ecpowergroup.com/wp-content/uploads/2014/07/Virtual-cell-design-and-system-sizing-with-Ni-rich-cathode-active-materials.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015

- <sup>39</sup> United States Geological Survey (USGS, 2015): Lithium. Online-Ressource, Link: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2015-lithi.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>40</sup> Ketterer et al. (2009): Lithium-Ionen Batterien – Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen (Wissenschaftliche Berichte FZKA 7503). Online-Ressource, Link: <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7503.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- <sup>41</sup> 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](http://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2002/_3.html), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>42</sup> 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 13.12.2015
- <sup>43</sup> Dr. Rüdiger Paschotta/RP Photonics Consulting GmbH (2015): Netznutzungsentgelt. Online-Ressource, Link: <https://www.energie-lexikon.info/netznutzungsentgelt.html/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>44</sup> 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\\_Beitrug\\_H\\_Hoefling.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/06_Hintergrundinformationen/2011_01_SAZ_4_Beitrug_H_Hoefling.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>45</sup> Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE)/Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (DKE) (2015): Kompendium: Li-Ionen-Batterien im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic – Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. Online-Ressource, Link: [http://schaufenster-elektromobilitaet.org/media/media/documents/dokumente\\_der\\_begleit\\_und\\_wirkungsforschung/Kompendium\\_Li-Ionen-Batterien.pdf](http://schaufenster-elektromobilitaet.org/media/media/documents/dokumente_der_begleit_und_wirkungsforschung/Kompendium_Li-Ionen-Batterien.pdf), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>46</sup> The Publications Office / European Union (EUR-Lex, 2015): Verordnung (EU) Nr. 347/2013 des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2013 zu Leitlinien für die transeuropäische Energieinfrastruktur und zur Aufhebung der Entscheidung Nr. 1364/2006/EG und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 713/2009, (EG) Nr. 714/2009 und (EG) Nr. 715/2009 (Text von Bedeutung für den EWR). Online-Ressource, Link: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013R0347&from=EN/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>47</sup> 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 13.12.2015
- <sup>48</sup> 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](https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis_Bevoelkerungsschutz/Band_13_Notstromversorgung.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt abgerufen am 13.12.2015
- <sup>49</sup> Fraunhofer ISI (2012): Bewertung des Aufbaus einer Ladeinfrastruktur für eine Redox-Flow-Batterie-basierte Elektromobilität. Online-Ressource, Link: [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e-x/de/working-papers-sustainability-and-innovation/WP06-2012\\_redox-flow-batterie.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e-x/de/working-papers-sustainability-and-innovation/WP06-2012_redox-flow-batterie.pdf), abgerufen am 13.12.2015

# 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

G+S Büro für Grafik und Satz Roswitha Tuz, 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.

