

GESAMT-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030



VORWORT



Elektromobilität gilt als Schlüssel zu einer nachhaltigen klima- und umweltverträglichen Mobilität. Während konventionelle Automobile mit Verbrennungsmotor nicht nur durch ihre CO₂-Emissionen, sondern auch mit Lärm, Feinstaub und Abgasen besonders in deutschen Großstädten und Metropolen weltweit die Umwelt belasten, können Elektrofahrzeuge einen Ausweg schaffen und hin zu einer „grünen“ Mobilität führen. Hinzu kommen auf gesellschaftspolitischer Ebene die Vorteile, dass der zunehmende Einsatz von Elektrofahrzeugen die Abhängigkeit von Erdölimporten verringern und eine große Chance für die Industrie in Deutschland bergen kann, falls es gelingt, den Wirtschaftsstandort im Kontext des Systemwandels Elektromobilität international wettbewerbsfähig zu positionieren. Durch den dadurch forcierten Wandel der etablierten Wertschöpfungskette in der Automobilindustrie entsteht eine hohe Dynamik in einer der immer noch erfolgreichsten Branchen in Deutschland, welche unter anderem auch die Energiewirtschaft, IT und Mobilitätsdienstleister erfasst. In den betroffenen Industrieunternehmen bestehen heute noch größere Unsicherheiten bezüglich der weiteren technologischen Entwicklungen, Implikationen und richtigen Strategien für die Zukunft.

Die vorliegende „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ fokussiert auf reine batterieelektrische (BEV), Plug-in Hybride (PHEV) und Hybridelektrofahrzeuge (HEV). Sie beleuchtet die konkreten Entwicklungspotenziale von Lithium-Ionen-Batterien und künftiger Generationen von elektrochemischen Energiespeichern, welche als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität ganz wesentlich auch über die Entwicklung

künftiger Fahrzeugkonzepte entscheiden werden. Durch die Festlegung von Mindestanforderungen der Elektrofahrzeuge an einzelne Leistungsparameter der darin einzusetzenden Batterien werden diejenigen technologischen Entwicklungen identifiziert, welche für Elektrofahrzeuge die größten Potenziale aufweisen.

Die Roadmap zeigt, dass bis zum Zeitraum 2025/2030 keine alternative Batterietechnologie zur Lithium-Ionen-Batterie bereit stehen dürfte, welche allen Anforderungen für den Einsatz in Elektrofahrzeugen genügen kann. Die Weiterentwicklung und Optimierung der Lithium-Ionen-Batterietechnologie wird daher nach heutiger Einschätzung noch mindestens für die kommenden zwei Jahrzehnte in elektromobilen Anwendungen dominieren. Insbesondere werden auf Basis eines tieferen Verständnisses der Gesamtzusammenhänge die Aktiv- und Passivmaterialien wie auch die Produktionsverfahren der Lithium-Ionen-Technologie noch deutlich weiterentwickelt werden. Danach könnten potenziell disruptive Batterietechnologien wie die Lithium-Schwefel- oder Lithium-Feststoff-Batterie zur Integration in Elektrofahrzeugen kommen, jedoch müssten sie dann deutlich höheren Anforderungen an Energiedichten, Kosten, etc. durch bis dahin deutlich optimierte Lithium-Ionen Batterien gerecht werden. Langfristig wird es wichtig sein, nicht von einer einzigen Technologie abhängig zu sein, weshalb auch in Zukunft die intensive FuE an vielversprechenden Energiespeicherlösungen für die Elektromobilität im Fokus stehen sollte, jedoch kann die Lithium-Ionen Batterie als eine mit Blick auf eine hochskalierbare Produktion etablierte Plattformtechnologie den Weg in diese noch ungewisse Zukunft überbrücken und dabei den Auf- und Ausbau der Elektromobilität mindesten bis 2030 sichern.

Damit soll die Roadmap nicht nur Akteuren der Energiewirtschaft, -politik und -forschung, sondern auch der interessierten Öffentlichkeit Orientierung geben, wie sich Elektromobilität aus der Perspektive der Batterie als Schlüsseltechnologie in den nächsten 15 Jahren entwickeln dürfte.

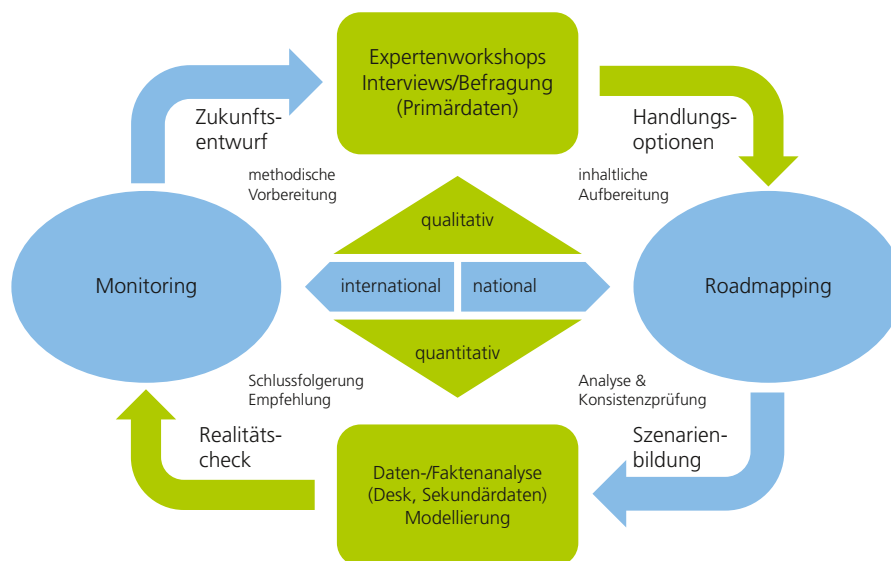
Prof. Dr. Arno Kwade
Technische Universität Braunschweig
Institut für Partikeltechnik

EINLEITUNG

GESAMT-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030

Die „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ verbindet die „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ mit der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“, indem die wahrscheinlichsten Entwicklungspfade von der Zell- und Systemebene bis in die Fahrzeugintegration aufgezeigt werden. Sie fokussiert auf reine batterieelektrische (BEV), Plug-in hybride (PHEV) und Hybridfahrzeuge (HEV). Gegenüber der Perspektive der Anforderungen an Elektrofahrzeuge und deren zukünftigen Entwicklung werden hier die konkreten Entwicklungspotenziale von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) und zukünftiger Generationen von Energiespeichern beleuchtet.

Nach einer ausführlichen Diskussion der FuE-Fortschritte der letzten Jahre im Bereich der Batterieentwicklung für Elektrofahrzeuge geben Lernkurvenanalysen Aufschluss über den aktuellen Stand und die weiteren Entwicklungspotenziale der LIB-Technologie. Eine Definition der Mindestanforderungen der Fahrzeuge an einzelne Leistungsparameter der Batterien erlaubt es schließlich diejenigen technischen Entwicklungen zu identifizieren, welche für BEV, PHEV und HEV Potenziale aufweisen und realistisch bis 2030 in diesen Anwendungen eingesetzt werden. Die Zeitpunkte, wann alle Anforderungen bzw. Herausforderungen technisch erreichbar sind und ein Technologiewechsel sowohl innerhalb der LIB-Technologie als auch bzgl. Post-LIB (wie z. B. der Lithium-Schwefel (Li-S)- oder Metall-Luft-Batterien) stattfinden könnte, werden identifiziert und detailliert diskutiert.



VORGEHEN UND METHODIK

Der Erstellung aller Roadmaps liegt ein methodisch gestütztes Vorgehensmodell zugrunde. Hierbei werden qualitative und quantitative Forschungsmethoden kombiniert. Ebenso erfolgt jeweils (soweit möglich) ein Abgleich der nationalen (bzw. teilweise EU-) Perspektive der Roadmap mit internationalen Entwicklungen, wodurch das Roadmapping durch ein Monitoring ergänzt und gestützt wird.

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

KERNAUSSAGEN

Die Roadmap zeigt, dass bis 2030 keine alternative Batterietechnologie zur LIB bereit steht, welche allen Anforderungen für den Einsatz in Elektrofahrzeugen genügen könnte. Die Weiterentwicklung und Optimierung der LIB-Technologie wird daher nach heutiger Einschätzung noch mindestens für die kommenden zwei Jahrzehnte in elektromobilen Anwendungen dominieren. Die Potenziale hierfür liegen vor, denn Lernkurven aus der Entwicklung der kleinformatigen LIB-Technologie für Anwendungen der Konsumelektronik zeigen, dass bis etwa 2030 eine Verdopplung der Energiedichte (bis zu 300 Wh/kg) und eine Kostenreduktion unter 100 €/kWh von LIB-Zellen möglich sind. Potenziell in

punkto Energiedichte disruptive Technologien wie die Li-S oder Lithium-Feststoff-Batterien (Li-Feststoff) müssten daher neben der Anforderung an die (groß)produktionstechnische Realisierbarkeit zusätzlich mit solch geringen Kosten konkurrieren, um überhaupt für den Einsatz in Elektrofahrzeugen attraktiv zu sein. Die Erkenntnis der „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ aus dem Jahr 2012, dass Li-S nicht vor dem Jahr 2030 in Elektrofahrzeugen zu erwarten sind, gilt damit weiterhin. Dennoch wird es wichtig sein, diese alternativen Zukunftstechnologien weiterzuentwickeln, da alleine die potenziell (praktisch) erreichbaren Energiedichten deutlich jenseits der 400 Wh/kg (Zellebene) liegen und ganz neue Möglichkeiten für Anwendungen, ihr Design und Geschäftsmodelle sowie Reichweiten ermöglichen können.

Für die Hochenergie-LIB (HE-LIB) sieht der Entwicklungspfad bis 2030 wie folgt aus: Unter den heute teilweise noch eingesetzten Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) für HEV und großformatigen LIB-Technologien für PHEV und BEV mit z. B. Lithium-Eisenphosphat (LFP)-, Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC)- oder Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA)-Kathode und Graphit-Anode stellt sich die NMC-basierte Zellchemie aktuell als vielversprechendste Wahl für die weitere Optimierung der Energiedichte heraus. Entwicklungen laufen hin zu Lithiumreichen, Kobalt-reduzierten (und damit Nickel-reichen) optimierten HE-Systemen (HE-NMC) mit Anoden aus Silizium-Kohlenstoff (Si/C)-Kompositen (aktuelle FuE). Ankündigungen zukünftiger Elektrofahrzeugmodelle legen nahe, dass Automobilhersteller weltweit in den kommenden Jahren zunehmend auf diese Entwicklung setzen, um im kommenden Jahrzehnt in der Reichweite optimierte Elektrofahrzeuge auf den Markt zu bringen. Damit trägt die Optimierung der Batterietechnologie ganz klar zur Kostenreduktion der Elektrofahrzeuge sowie einer Verdopplung der Reichweite bei. Eine weitere ggf. erreichte Verdopplung (insgesamt evtl. vierfache Reichweite jenseits 2030 gegenüber heutigen Referenzfahrzeugen) ist parallel durch ingenieurtechnische Verbesserungen (z. B. auf Systemebene, durch Leichtbauinnovationen etc.) durch eine Optimierung des Energieverbrauchs (km/kWh) zu erwarten.

Mit der Aussicht, bis 2030 eine solche Energiespeichertechnologie zu Preisen von ggf. 50 bis 100 €/kWh zur Verfügung zu haben, eröffnen sich spätestens dann Diffusionspotenziale auch in stationären Speicheranwendungen. Eine deutliche Verschränkung von Anwendungen, Geschäftsmodellen, Märkten und schließlich Infrastrukturen zwischen dem Transportsektor, Gebäude/Infrastruktur (privat, gewerblich, öffentlich etc.) und Energienetzen sollte ab dann spätestens sichtbar werden. Die parallel zur vorliegenden „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ veröffentlichten Roadmaps zur stationären Energiespeicherung vertiefen daher auch dieses Thema.

FORTSCHRITTE IN DER BATTERIEFORSCHUNG UND -PRODUKTION

Seit der Markteinführung der ersten Elektrofahrzeugmodelle und der in den letzten fünf Jahren angestiegenen Verkaufszahlen konnten Batterie ebenso wie Automobilhersteller Erfahrungen sammeln, welche Batterietechnologien sich für den Einsatz in Elektrofahrzeugen eignen. Dabei stehen heute angesichts der im Markt befindlichen Elektrofahrzeuge die Mindestanforderungen an Fahrzeugbatterien fest.

Diese betreffen ganz besonders Anforderungen an deutlich erhöhte Energiedichten, um die Reichweite der Elektroautos zu erhöhen, sowie den Preis bzw. die Kosten der Batterien, um Elektrofahrzeuge zu einer Massenmarktauglichkeit hinzuführen. Daneben gilt es weiterhin, die Lebensdauer (kalendarisch und zyklisch) bei optimierten Batterien mindestens aufrecht zu halten, idealerweise aber auf 10 bis 15 Jahre Einsatzfähigkeit und eine hohe Zyklenzahl zu bringen, so dass beispielsweise auch höhere C-Raten für die Schnelladefähigkeit etc. darstellbar werden. Die Sicherheit der Batterien gilt dabei aber stets als Voraussetzung.

Um einzuschätzen und bewerten zu können, in welchen der zentralen Parametern der Energiedichte, Lebensdauer, Sicherheit und Kosten sich zukünftig weitere Entwicklungspotenziale ergeben werden, lohnt es sich zunächst nach den in den letzten Jahren erreichten Verbesserungen zu fragen, sowohl aus der Grundlagen-FuE- als auch der Produktionsperspektive. Dies erlaubt es, anschließend den aktuellen Stand der Entwicklungen besser einzusortieren und führt schließlich zu dem Ausgangspunkt der vorliegenden Gesamt-Roadmap, welche bis 2030 und darüber hinaus aufgezeichnet wird.

ENERGIEDICHTE

Große Fortschritte bei der FuE an Anodenmaterialien (jenseits Graphit) in den letzten Jahren weisen für Silizium-Kohlenstoff (Si/C)-Komposit-Materialien auf das Potenzial hin, bis ggf. 2018 ungefähr 500mAh/g spezifische Kapazität (in der Grundlagen-FuE) zu erreichen. Der Silizium-Anteil wird sich dabei um wenige Procente bis maximal 10 bis 20 Prozent erhöhen. Eine kritische

Obergrenze liegt vor, da reines Silizium Volumenschwankungen beim Laden und Entladen mit sich bringt. Im Produktionsmaßstab sind solche Materialien dann mit einigen Jahren Verzögerung bzw. nach dem Jahr 2020 zu erwarten.

Bezüglich der genannten Obergrenze von Silizium in Si/C-Anoden steht z. B. fest, dass der Einsatz höherer Prozentanteile gar nicht lohnend ist, da bei Betrachtung der gesamten Zelle die passenden Kathodenmaterialien dazu trotz positiver Entwicklung hinsichtlich der geforderten Kapazität noch nicht zur Verfügung stehen.

Hochenergie (HE)-Kathoden (engl. auch „Li-rich“) mit einer vielversprechenden Kapazität von ungefähr 270mAh/g sollten bis zum Jahr 2020 zur Verfügung stehen – die Entwicklung verläuft hier evolutionär und nicht revolutionär, mit vielen kleinen, kontinuierlichen Verbesserungen bis hin zur Einsatzreife. Auf der anderen Seite gab es hinsichtlich der hochnickelhaltigen Kathodenmaterialien in den letzten Jahren eher enttäuschende Resultate. Die Versprechen von hoher Spannung und hoher Energiedichte haben sich nicht erfüllt, ganz im Gegenteil sind neue Probleme aufgetreten. Angesichts der Entwicklung von Hochvolt (HV)-Elektroden stellt die Bereitstellung eines passenden Elektrolyten noch eine Schwachstelle dar, er gilt allerdings als Schlüsselfaktor.

Hochvolt (HV)- aber besonders Hochenergie (HE)-Kathoden dürften bald in die Produktion gehen bzw. die Vorbereitungen hierzu laufen („HV“-Batteriezellen mit 4,2 Volt werden mittlerweile sogar auf NCA-Basis von der Panasonic Corp. anvisiert – 4,3 Volt gibt es ebenfalls bereits). Hier haben sich Verbesserungen ergeben, nachdem bei Lithium-Ionen-Batterien (LIB) lange 4,1 Volt-Zellen etabliert waren (selbst im Bereich mit höchster Energiedichte) und nun die 4,2 Volt-Batteriezellen kommen. Experimente laufen mit 4,35 Volt-Zellen, was aber noch zulasten der Lebensdauer geht, „richtige“ Hochvoltzellen mit 4,5 Volt oder mehr gibt es heute noch nicht. Für den dazu kompatiblen Elektrolyten gibt es zwar Ideen, Probleme bestehen aber z. B. in der Elektrolytzersetzung und Separator-Korrosion bzw. mit der Leitfähigkeit

Eigenschaften (Schlüsselparameter)	Fortschritte in der Grundlagen-FuE	Fortschritte in der Produktion
Energiedichte	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrolyt als Schwachstelle (Alterung, Sicherheit, HV-Fähigkeit) • Verbesserte Anodenmaterialien (Si/C-Komposite mit ungefähr 500 mAh/g um 2018?) • Kathodenmaterial-FuE positiv: HE-Kathoden (ungefähr 270 mAh/g um 2020, „Li-rich“?), enttäuschende Resultate bzgl. „High-Ni“, „Li-rich“ als Ausweg? • Zellebene: Li-S, Si/C-Komposite vielversprechend; 250 Wh/kg wie in 18650-Batteriezellen noch zu erreichen • Systemebene: Li-S fällt ab, LIB haben weiterhin Potenzial 	<ul style="list-style-type: none"> • HE-/HV-Kathoden unproblematisch • Substitution von LMO durch NMC, da Volumenausnutzung besser (höhere Energiedichte) • Optimierung „klassischer“ LIB funktioniert gut (→ Plattformtechnologie)
Lebensdauer	<ul style="list-style-type: none"> • Thermomanagement und Isolation im Batteriesystem • Verbesserungen durch neue Additive • Fortschritte bei Li-S-Batteriesystemen • Erhöhte Zyklenfestigkeit durch neuartige Bauweisen auf Zellebene 	<ul style="list-style-type: none"> • Fortschritte bei LFP-basierten Batteriezellen, NCA/NMC-Kathodenentwicklung, LTO-Anodenentwicklung (Hochleistung) • Höhere Lebensdauer bei Wegfall von LMO und neue Additive • Anforderungen für HEV, PHEV und BEV erreicht (>5000 Zyklen, >10 Jahre)
Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Energiedichten (→ geringere Fehlertoleranz) 	<ul style="list-style-type: none"> • System/(Zelle): VDA-Standard zur Fahrzeugintegration großformatiger Batteriesysteme mit Crash-Sicherheit • Deutliche Verbesserung durch System-Komponenten • Keramische/HT-stabile Separatoren (keramische Beschichtung, gefüllte Polymere, Ready-to-use-Dispersion, Vollkeramik auf Träger, Polyamide/-imide etc.) • Elektrolytmenge/-befüllung (→ Kosten/Sicherheit) • Höhere Energiedichte (→ unsicherer auf Zellebene → Standardisierung)
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> • Finanzmodelle für Batteriepacks als Ausweg für (vor allem kalendarisch) unzureichende Lebensdauer und Umweg für hohe Kosten • Bedarf an hohen Zyklenzahlen und Schnellladung → der Markt als Treiber • Kostenreduktion durch Ersatzstoffe, z. B. Co substituiert durch Ni 	<ul style="list-style-type: none"> • Wässrige Elektrodendispersionen in Serie für Anode, FuE für Kathoden • Elektrolyte (Preisverfall) • Verbindungstechnik, Schweißverfahren • Prozessoptimierung: Fokus auf Kostensenkung, stärkere Manufacturing-Betrachtung, Upscaling der Produktion, Kosten sinken schneller als erwartet, Durchsatz steigt, Synergien in Wertschöpfungskette, attraktives/produktionsoptimiertes Design • Kostensenkung durch Standardisierung • Konkurrenz durch und Orientierung an Joint Venture von Tesla Motors Inc. und Panasonic Corp.
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> • Supercaps als Alternative in Anwendungen haben an Aufmerksamkeit gewonnen • Bzgl. Li-S und Li-Luft noch viele Fragen offen, Lithium-Feststoff-Batterie (engl. „All solid state battery“) hat an Aufmerksamkeit gewonnen, Konzentration trotzdem auf optimierte LIB 	<ul style="list-style-type: none"> • Systemverständnis, breitere Entwicklungsbasis • Entwicklungseffizienz, Tools • BMS: Balancing, Modelle/Vorhersagen, Nutzung • Umdenken in finanzieller Bewertung, Stichwort: TCO

von Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆) mit steigender Spannung. Prototypen weisen kaum zyklische Lebensdauer auf und sind nicht wirklich temperaturbeständig. Von der in der Automobilindustrie geforderten Lebensdauer von mindestens 8 bis 10 Jahren ist man somit noch immer weit entfernt.

Interessant ist, dass mit der 18650-Zelle eine frühe Batteriegeneration bzw. kleinformatige Zelle gegenüber den aktuellen HV- und HE-Entwicklungen (gemessen an der Energiedichte und damit Reichweiten in Elektrofahrzeugen) zunächst durchaus höhere Potenziale aufweist als die neuen, innovativen großformatigen Batterietechnologien. Dabei ist hinsichtlich der Fahrzeugintegration aber nicht nur die Energiedichte relevant, sondern es ergeben sich damit durchaus interessante Möglichkeiten des Designs. Im Tesla Motors Inc.-Ansatz wird eine enorm große Anzahl von Batteriezellen eingebaut, welche nur eine niedrige (spezifische) Leistung (pro Zelle) aufweisen – diese Batterien sind vor allem für BEV interessant, schon für PHEV sind andere Leistungsdichten relevant. Ein Vorteil der 18650-Zelle liegt neben der hohen Energiedichte im Batteriesystem (gut für u. a. Heizung und Kühlung) auch in der zyklischen Lebensdauer, denn die Batterie kann problemlos 1000 Zyklen durchlaufen, um die Reichweite von 300 000 Kilometern zu erreichen – das Problem eines Batteriewechsels innerhalb der Fahrzeuglebensdauer entfällt in dieser Hinsicht.

Mit den kleinformatigen Zellen sind Energiedichten von 250–270Wh/kg gerade über bessere Anodenmaterialien anvisiert, wurden aber noch nicht auf großformatige Batterien übertragen. Eine typische großformatige Zelle für den Automotivbereich liegt derzeit zwischen 150–160Wh/kg – diese Lücke sollte geschlossen werden und ist auf Basis der Lernkurven in der kommenden Dekade zu erwarten. Heute wird davon ausgegangen, dass dies mit HE-NMC Kathoden (von NMC:111 über NMC:532, NMC:622 bis hin zu NMC:811, mit entsprechenden Anteilen von Nickel, Mangan und Kobalt) und schließlich auch dem Ersatz von Graphit- Anoden durch Si/C-Komposit-basierte Anoden gelingt. In der oben beschriebenen Kombination wären daher eine Ausreifung der Technologie jenseits 2020, die produktionstechnische Umsetzung bis ca. 2025 und der Einsatz im Fahrzeug anschließend bis 2030 zu erwarten. Zwischenstufen der Entwicklung (insbesondere HE-NMC/Graphit) dürften sukzessive in den Markt eintreten.

In jedem Fall zugenommen hat in den letzten Jahren die Forschungstätigkeit in Deutschland, sowohl an Anoden- als auch an Kathodenmaterialien. Gerade vor dem Hintergrund der Post-LIB (z. B. Lithium-Schwefel (Li-S)- oder Lithium-Sauerstoff (Li-Luft)-Batterien) wurden gute Fortschritte in der Zell-FuE gemacht. Insbesondere hinsichtlich der zyklischen Lebensdauer und der

Energiedichte gibt es noch weiteren Forschungsbedarf. Vorteile der Li-S gegenüber der LIB auf Zellebene verschwinden bereits auf Systemebene und die Einschätzung bzw. Erwartung an diese Systeme für den Einsatz in Elektrofahrzeugen haben sich deutlich in die Zukunft verlagert. Jedoch ist weiterhin Grundlagen-FuE (auch bzgl. ihrer Produktionsfähigkeit) notwendig, um diese Systeme langfristig weiterzuentwickeln.

In der Roadmap sind daher einerseits diese (heute am sichersten eingeschätzten) Entwicklungen der optimierten LIB-Technologie (HE und HV) verortet. Daneben stellt sich aber auch weiterhin die Frage, ob es zukünftig eine Technologie mit Disruptionspotenzial hinsichtlich der Energiedichte und damit auch Reichweite in einem Elektrofahrzeug geben kann.

Entwicklungen, welche heute noch nicht einmal im Labor funktionieren oder produktionstechnisch umsetzbar sind, sind vor 2030 nicht in einem Fahrzeug zu erwarten. Dennoch könnten Li-S, LIB mit 5V Zellspannung (5V-LIB) oder Feststoff-Batterien jenseits 2030 weitere Vorteile (insbesondere höhere Energiedichten) mit sich bringen und werden daher vertieft diskutiert.

Hinsichtlich der prismatischen Zellen zeichnet sich in den letzten Jahren beispielsweise ein Ersatz von Lithium-Mangan-Spinellen (bzw. LMO, hohe Sicherheit damals als Einsatzgrund) durch NMC ab auf dem Weg zu höheren Energiedichten (als Kathodenmaterial noch relativ sicher und für Elektrofahrzeuge geeignet) ab. Weiterhin wird der zur Verfügung stehende Raum in einer prismatischen Zelle wesentlich effizienter ausgenutzt als bisher. Damit geht diese Zelle hinsichtlich der Raumausnutzung in Richtung der 18650er-Zellen. Jedoch müssen diese noch optimiert werden (Stichworte: Multiple coin cell-Beschichtung, Elektrodenbreiten, Verdichtung insgesamt). Durch die Optimierung der einzelnen Schichten kommt die FuE dann in den Grenzbereich, wo eben noch alle Sicherheitsanforderungen bestanden werden – mit höherer Energiedichte.

Interessant ist vor diesem Hintergrund, dass die Steigerung der Energiedichte in den letzten Jahren nicht durch grundlegend neue Materialien, sondern mit den „klassischen“ Materialien durch eine Optimierung des „klassischen“ Systemaufbaus erzielt wurde. Material-FuE ist deshalb auch für die Zukunft wichtig, großes Optimierungspotenzial scheint aber auch auf der Ebene der Zelle bis zum Pack- bzw. der Systemintegration realisierbar zu sein. Eine materialseitige Steigerung der Energiedichte wird mit Hinblick z. B. auf die Anodenmaterialien (momentan werden Siliziumhaltige, hochgradig energiekapazitive Anoden in 18650er-Konsumergerätebatterien quasi schon umgesetzt) erwartet, ein Trend, der später auch in der Automobilindustrie erwartet wird.

LEBENSDAUER

Das Thermomanagement und die Isolation im Batteriesystem werden eine zunehmende Rolle spielen, da nicht einzelne Zellen, sondern Batterie-Packs betrieben werden und dies in unterschiedlich warmen und kalten Regionen z. B. Europas. Ein „Thermal runaway“ bzw. Batteriebrand im Fahrzeug wäre problematisch für die Akzeptanz der Technologie, weshalb ein Thermomanagement eine sehr bedeutende Rolle spielt. Leider beschäftigen sich heute damit eher noch kleinere Firmen, erzielen aber bereits Erfolge. Verbesserungen haben schließlich auch Auswirkungen auf die Belastbarkeit der Batterien und sind weiterhin voranzutreiben und zu unterstützen.

Allerdings sollte deutlich zwischen der Materialentwicklung auf Zellebene einerseits getrennt werden, in welcher das größte Verbesserungspotenzial gesehen wird, z. B. durch neue Additive oder Oberflächenbeschichtungen, deren Modifikationen die Lebensdauer der Zelle wesentlich beeinflussen und damit verbessern, aber auch die Energiedichte erhöhen. Andererseits ist das Thermomanagement zu sehen, welches eher auf das Gesamtsystem abzielt und wobei sich die Frage stellt, wie eine Zelle hinsichtlich des Thermomanagements optimiert werden kann. Gerade Tesla Motors Inc. hat hier ein ganz neues Konzept auch bzgl. der Sicherheit bei den Zellen eingeführt, um die Kosten zu senken und die Sicherheit zu erhöhen. Auf beiden Ebenen sind somit Entwicklungen zu beobachten, allerdings mit Schwerpunkt auf der Materialentwicklung.

Fortschritte bei Li-S-Batteriesystemen sind im Hinblick auf die Lebensdauer vor allem in dem Erreichen höherer Zyklenzahlen zu beobachten. Die größte Schwachstelle bleibt nach wie vor ihr Hochtemperaturbeständigkeit. Die FuE ist hier mit Blick auf Anwendungen der Elektromobilität und entsprechenden Anforderungen noch im Grundlagenbereich befindlich, wobei die Zyklenbeständigkeit als einer der wichtigsten Schlüsselparameter gilt. 600 bzw. 700 Zyklen sind heute schon erreichbar (etwa eine Verdreifachung im Vergleich zu einigen Jahren zuvor), bis 2020 sind 1000 Zyklen weiterhin realistisch zu erwarten (Labormaßstab, keine Großproduktion). Zellen in Handygröße werden bereits heute produziert. Eine Marktverbreitung könnte das System evtl. in den nächsten fünf bis zehn Jahren im militärischen Bereich erfahren, wo sie heute schon mit wenigen Zyklen eingesetzt werden. Für die Anwendung in Elektrofahrzeugen bestehen jedoch weitere Anforderungen z. B. an die kalendarische Lebensdauer, volumetrische Energiedichte, Produktion und Kosten, wobei die Li-S-Batterietechnologie hinsichtlich dieser Parameter fortlaufend mit einer optimierten LIB-Technologie zu vergleichen und zu bewerten ist.

FuE-Ergebnisse der letzten Jahre zeigen, dass die Lebensdauer (auch die kalendarische) von Pouch-Zellen steigt, wenn die Alterung durch neuartige Bauweisen aufgehalten wird. Die Zyklenfestigkeit kann somit auch durch entsprechendes Engineering optimiert werden.

Fortschritte bei LFP (Kathoden)-, NCA/NMC (Kathoden)- und LTO (Anoden, Hochleistungs-Batterien)-basierten Batteriezellen sind ebenfalls zu verzeichnen. Die heute zur Verfügung stehenden Materialien haben eine höhere Qualität (LTO-Anoden sind z. B. 20 bis 30 Prozent temperaturstabiler) als vor einigen Jahren, was sich bereits im Produktionsmaßstab niederschlägt. LTO-Materialien sind wegen der geringeren Energiedichte und wahrscheinlich höheren Kosten zukünftig vermutlich eher für die Verwendung in Hybridanwendungen denkbar. Die Zyklenfestigkeit hat sich hier ebenfalls um 20 bis 30 Prozent verbessert.

Durch den Wegfall von LMO und unter Verwendung neuer Additive werden schon heute produktionstechnische Verbesserungen und damit höhere Lebensdauern erreicht.

Die Anforderungen an Elektrofahrzeuge (HEV, PHEV und BEV) sind mit >5000 Zyklen und >10 Jahren heute quasi erreicht. Der Optimierungsbedarf ist daher weiterhin in der Energiedichte und den Kosten zu sehen. Klassische LIB sind bzgl. ihrer Lebensdauer damit bereits auf einem sehr guten Leistungsniveau und können die Lebensdauer eines Elektrofahrzeuges unter normalen Temperaturbedingungen überstehen. Das Thermomanagement ist wichtig, aber die Lebensdauer stellt keinen engl. „Show-stopper“ mehr dar, wie es vor etwa fünf Jahren noch der Fall war.

In Summe sind in der Lebensdauer und insbesondere der Zyklenfestigkeit in den letzten Jahren durchaus weitere Fortschritte zu verzeichnen gewesen.

SICHERHEIT

Das Erreichen höherer Energiedichten bei geringerer Fehlertoleranz stellt ein Problem dar, welchem z. B. in der FuE von hochnickelhaltigen Materialien gerade begegnet wird: Je höher die gewünschte Kapazität sein soll bzw. je mehr Nickel eingesetzt wird, desto geringer ist die Toleranzschwelle des Kathodenmaterials hinsichtlich einem „Thermal runaway“. Als Gegenmaßnahme wird mit sog. „Core/Shell“-Materialien experimentiert, um die reaktiven Bestandteile durch eine äußere Schale sicher zu verpacken und so die Reaktivität zwischen Elektrolyt und Kathodenmaterial direkt zu reduzieren. Dieser Ansatz befindet sich allerdings erst in der Erprobung.

Für die Beschreibung und Prüfung der Sicherheit von Batterien sind eine Reihe von Normen und Prüfvorschriften entwickelt worden. Der Standard zur Fahrzeugintegration großformatiger Batterien des VDA bringt hierbei viele Vorteile mit sich. Die Fahrzeugintegration großformatiger Batterien kann nun auch hinsichtlich ihrer Crash-Sicherheit deutlich systematischer erarbeitet werden als in dem Fall der Integration vieler verschiedener Zellformate. Frühwarnsysteme z. B. können entwickelt und entsprechend ausgerichtet werden. Auch die Energiedichte mit entsprechender Packungs-/Integrationsdichte zu verbessern, ist vielversprechend und kann nun angegangen werden. Die Festlegung auf Industriestandards hinsichtlich der Batteriesystemgröße bzw. dem Zellformat ist daher ein produktionsnahes Thema, welches auch in Bezug auf die Kostensenkung vorteilhaft ist.

Keramische/Hochtemperatur (HT)-stabile Separatoren (keramische Beschichtung, gefüllte Polymere, Ready-to-use-Dispersion, Vollkeramik auf Träger, Polyamide/-imide etc.) sind gerade für die Sicherheit in Batteriezellen von Bedeutung. Viele Hersteller versuchen aktuell, das Thema Batteriesicherheit über die Keramik zu adressieren (z. B. Feststoff-Batterien), sei es konventionell durch die keramische Beschichtung eines Separators (z. B. LG Chem u. a.), durch die Polymer-Befüllung, mit vollkeramischem Separator (Litarion u. a. mit Separion®) oder Ansätzen, welche heute noch nicht produktionstechnisch realisierbar sind, und FuE Themen darstellen, wie temperaturstabile Filme oder Fasern.

Auch hat sich die in den Zellen eingesetzte Elektrolytmenge in den letzten Jahren deutlich verringert, was zu der Frage bzw. Herausforderung der Befüllung mit geringen Mengen in ausreichend kurzer Zeit geführt hat. Ansätze gibt es mit perforierten Ableiter-Folien bis hin zu ausgetüftelten Verfahren. Als Resultat haben sich folglich die Kosten (für weniger Elektrolyteinsatz in der Zelle) verringert aber ebenso die Sicherheit erhöht. Die Materialien selbst dürften allerdings auch in Zukunft nicht kostengünstiger werden, Kostensenkungen werden über einen reduzierten Materialeinsatz erreicht. Die Elektrolythersteller haben daher den größten Anteil unter den Material-/Komponentenherstellern aus dem Preisverfall der Batteriezellen der letzten Jahre zu tragen.

Höhere Energiedichten bringen auch das Problem verringerter Sicherheit auf Zellebene mit sich. Diese muss aber stets gewährleistet sein, was auch in einem kontinuierlich bzw. dauerhaft relevanten Bedarf nach Standardisierung resultiert. Die Beurteilung von Zellen nach EUCAR-Leveln könnte in Zukunft nicht mehr ausreichend sein und ggf. müssen ganze Systemlösungen nach ihrer Sicherheit beurteilt werden. Die in den letzten Jahren erzielten deutlichen Verbesserung durch Systemkomponenten zeigen daher, dass Optimierungspotenziale der Batterie durchgängig vom Material bis zum System vorliegen und in Zukunft weiter erschlossen werden können.

KOSTEN

Die Kosten für Batterien sind in den letzten Jahren drastisch gesunken, was sicherlich mit der noch geringen Marktnachfrage und gleichzeitig vorliegenden Überkapazitäten zusammenhängt. Asiatische Hersteller haben daher Zellen teilweise (vermutlich deutlich) unterhalb der Produktionskosten auf den Markt gebracht, um erfolgreich aus der abzusehenden Wettbewerbskonsolidierung hervorzugehen.² In den nächsten Jahren werden Materialinnovationen ebenso wie Skaleneffekte bei einer steigenden Produktion zu weiteren Verringerungen der Zellkosten und Systementwicklungen zur Kostenreduktion des Gesamtsystems Batterie führen. Jedoch ist noch abzuwarten, auf welchem Niveau sich die Kosten pro kWh für großformatige LIB bei einer besser planbaren Nachfrage einpendeln werden.

Auf Materialebene ist die Kostenreduktion der letzten Jahre z. B. auch auf den reduzierten Elektrolyteinsatz (wie bereits diskutiert) zurückzuführen. Auch mit wässrigen Elektrodendispersionen (in der Serienproduktion für Anoden und in FuE für Kathoden) kann eine Kostensenkung erzielt werden. Künftig sind Kostenreduktionspotenziale z. B. durch Co-reduzierte Kathoden zu erwarten.

Der Fokus auf Kostensenkung ist aber in der gesamten Produktion von Batteriesystemen wiederzufinden, auf jeder Wertschöpfungsstufe auch jenseits der Material- und Komponentenerstellung. Verbindungstechnik, Schweißverfahren spielen z. B. sowohl in Pouch- als auch in prismatischen Zellen eine große Rolle und tragen zu Kostenreduktionspotenzialen bei. Durch Prozessoptimierung sollen die Kosten sinken, der Durchsatz steigen, Synergien in der Wertschöpfungskette realisiert und ein attraktives, produktionsoptimiertes Design durchgesetzt werden. Eine stärkere Manufacturing-Betrachtung (inkl. Kostenoptimierung auf den unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen) und eine Hochskalierung der Produktion ebenso wie eine Kostensenkung durch Standardisierung dürften daher zu den anvisierten Kostenzielen der kommenden Jahre hinführen.

Durch das 18650er-Revival (Tesla Motors Inc./Panasonic Corp.) ist aber auch die Relevanz der kleinformatigen LIB-Zelle wieder deutlich angestiegen und ein weiterer Kostensenkungstreiber im Spiel, da sich auch die Entwicklung großformatiger Zellen an dieser Kostenentwicklung orientiert. Die kleinformatigen LIB-Zellen sind etabliert und werden von der Panasonic Corp. bereits hoch-effizient produziert. Tesla Motors Inc. hat damit eine verfügbare, in Massenproduktion günstig herstellbare Technologie zu seinem Vorteil ausgenutzt bzw. eingesetzt.

Aber auch Finanzmodelle für Batteriepacks, als Ausweg für eine noch unzureichende Lebensdauer und noch (zu) hohe Kosten am Elektrofahrzeug könnten eine Möglichkeit darstellen, um der

noch nicht vollständig ausgereiften Technologie zu einem (breiteren, schnelleren) Markteintritt bzw. der Diffusion zu verhelfen. Mit Leasingmodellen für Fahrzeugbatterien (beispielsweise Renault ZOE) kann z. B. die Zeit überbrückt werden, in welcher der Markthochlauf stattfinden soll, obwohl die Technologien noch nicht Massenmarktauglich ist (d. h. hohe Reichweite zu ähnlichen Preisen wie die herkömmlichen Automobile mit Verbrenner). Gerade der aktuelle Trend mehrerer Automobilhersteller zu höheren Reichweiten mit ca. 500 km und damit folglich höheren Batteriekosten am Elektrofahrzeug könnte damit wirtschaftlicher dargestellt werden. Gute Geschäftsmodelle bzw. Vermarktungsinstrumente können daher auch ein Schlüssel zum Massenmarkt werden. Neben dem Systemverständnis muss also gehören, die neuen Produkte an die Endkunden heranzubringen, die Kundenakzeptanz zu verbessern und Elektromobilität ins Bewusstsein der Bevölkerung zu bringen.

Neben der Kostenreduktion und einer erhöhten Energiedichte zur Verbesserung der Reichweite sind aber auch der Bedarf an hoher Zyklenfestigkeit und Schnellladung (z. B. auch deutlich unter 20 min. ca. 80 Prozent der Energie aufzunehmen) groß, da die Erwartungen und Anforderungen der Automobilhersteller weiter steigen bzw. sich an den Anforderungen für Massenmarktaugliche Elektrofahrzeuge orientieren und damit einen Treiber für Innovationen in der Batterie-FuE darstellen. Lösungen für optimierte Batterien, welche heute im Labor funktionieren, könnten in den kommenden zehn Jahren getrieben durch die wachsende Nachfrage in der Elektromobilität auf den Markt kommen. Wenn Batteriehersteller in diesem höchst kompetitiven Marktumfeld innovative Lösungen anbieten könnten, ergäbe sich direkt ein Wettbewerbsvorteil.

SONSTIGE ENTWICKLUNGEN

Als sogenannte „Stop and go“-Anwendungen sind Supercaps beispielsweise schon heute im Einsatz. Sie weisen deutlich höhere Zyklenzahlen auf, sind aber im Fahrzeugbereich mit der geringen Energiedichte nicht für einen Einsatz (zum Antrieb mit hoher Reichweite) relevant. Jedoch sind Entwicklungen um Li-basierte Supercaps vielversprechend, welche zu einer vier bis sechs Mal höheren Energiedichte als bisherige Supercaps führen können. Für stationäre ebenso wie elektromobile Anwendungen mit für diese Technologie relevanten Anforderungen wären diese Entwicklungen daher weiterhin zu beobachten.

Auch Post-LIB wie Li-S oder Li-Luft sind weiterhin zu beobachten, stehen jedoch mit vielen Herausforderungen mitten in der Grundlagenforschung. Ihre Anwendung in Elektrofahrzeugen ist daher erst sehr langfristig zu sehen. Herausforderungen bestehen u. a. bzgl. der (zyklischen) Lebensdauer, der Entwicklung eines festen

Elektrolyten bis hin zu Fragen, wie sich die Leistung über die gesamte Entladung hinweg gleichmäßig abrufen lässt oder wie komplex ein Batterie-Management-System (BMS) sein muss. Vor allem an Li-Luft haben vor einigen Jahren nur einzelne Arbeitsgruppen weltweit gearbeitet, mittlerweile steigt die Zahl der Publikationen und Patente rapide, was aber auch zu Fortschritten und neuen Erkenntnissen führt. Durchbrüche sind allerdings nicht zu erwarten, was sich z. B. auch daran zeigt, dass Akteure wie IBM Corp. in den USA offen ihren Ausstieg aus den Post-LIB-(FuE-)Aktivitäten bekannt gegeben haben. Unter den Post-LIB haben besonders Feststoff-Batterien (engl. „All solid state battery“) in den letzten Jahren an Aufmerksamkeit gewonnen.

Jedoch hat sich deutlich herausgestellt, wie auch diese Roadmap zusammenfasst, dass eine optimierte LIB-Technologie noch für die nächsten (mindestens zwei) Jahrzehnte Entwicklungspotenziale (aber auch FuE-Herausforderungen) aufweist, mit welcher der Markthochlauf und die Diffusion der Elektromobilität realisierbar sind. LIB stellen produktionstechnisch eine etablierte Plattformtechnologie hierfür dar. Jenseits der Batterietechnologie bzw. Zellchemie sind aber auch ein Systemverständnis insgesamt und eine breite Entwicklungsbasis notwendig, um den komplexen Herausforderungen im (System-)Wandel der Elektromobilität gerecht zu werden. Hier spielen Entwicklungseffizienz und entsprechende Tools z. B. zur Auslegung von Batterien eine wichtige Rolle, wobei das Energiemanagement ein Beispiel sein kann: BMS und hierbei das Balancing, Modelle/Vorhersagen von Batterieverhalten und Nutzung wurden in den letzten Jahren immer besser. Auch bringen Fahrzeugentwickler weltweit mittlerweile ein gewisses Verständnis mit, um Elektrofahrzeuge aus einer Gesamtsystem-Perspektive „neu zu denken“, Wissen, das in den letzten Jahren erst aufgebaut werden musste.

Schließlich ist auch hinsichtlich der (finanziellen) Bewertung von Elektrofahrzeugen ein Umdenken zu beobachten: So werden zunehmend auch bei Batteriesystemen „Total Cost of Ownership“ (TCO)-Berechnungen wichtiger, um zu beurteilen, was die gespeicherte Kilowattstunde bzw. der gefahrene Kilometer kostet und wie sich Elektroautos gegenüber heutigen Benzin oder Diesel betriebenen Automobilen präziser vergleichen lassen. In TCO-Berechnungen sind neben den Anschaffungs- und Betriebskosten (inkl. der Stromladung) auch die Batteriegröße, die Zyklenzahl und kalendarische Lebensdauer zu berücksichtigen, um entsprechend die Kosten der elektrisch fahrbaren Kilometer zu ermitteln. Zumindest für BEV wären diese Berechnungen und Vergleiche lohnenswert. Jedoch ist mit Blick auf den potenziellen Käufer zu beachten, dass dieser in der Regel eben nicht nur die Kosten pro Kilometer rein wirtschaftlich betrachtet, sondern sich oftmals von Emotionen leiten lässt und deshalb weitere (nicht-technische) Aspekte wie das „grüne“ Image, die Automobilmarke, Fahrspaß etc. eine Rolle spielen werden.

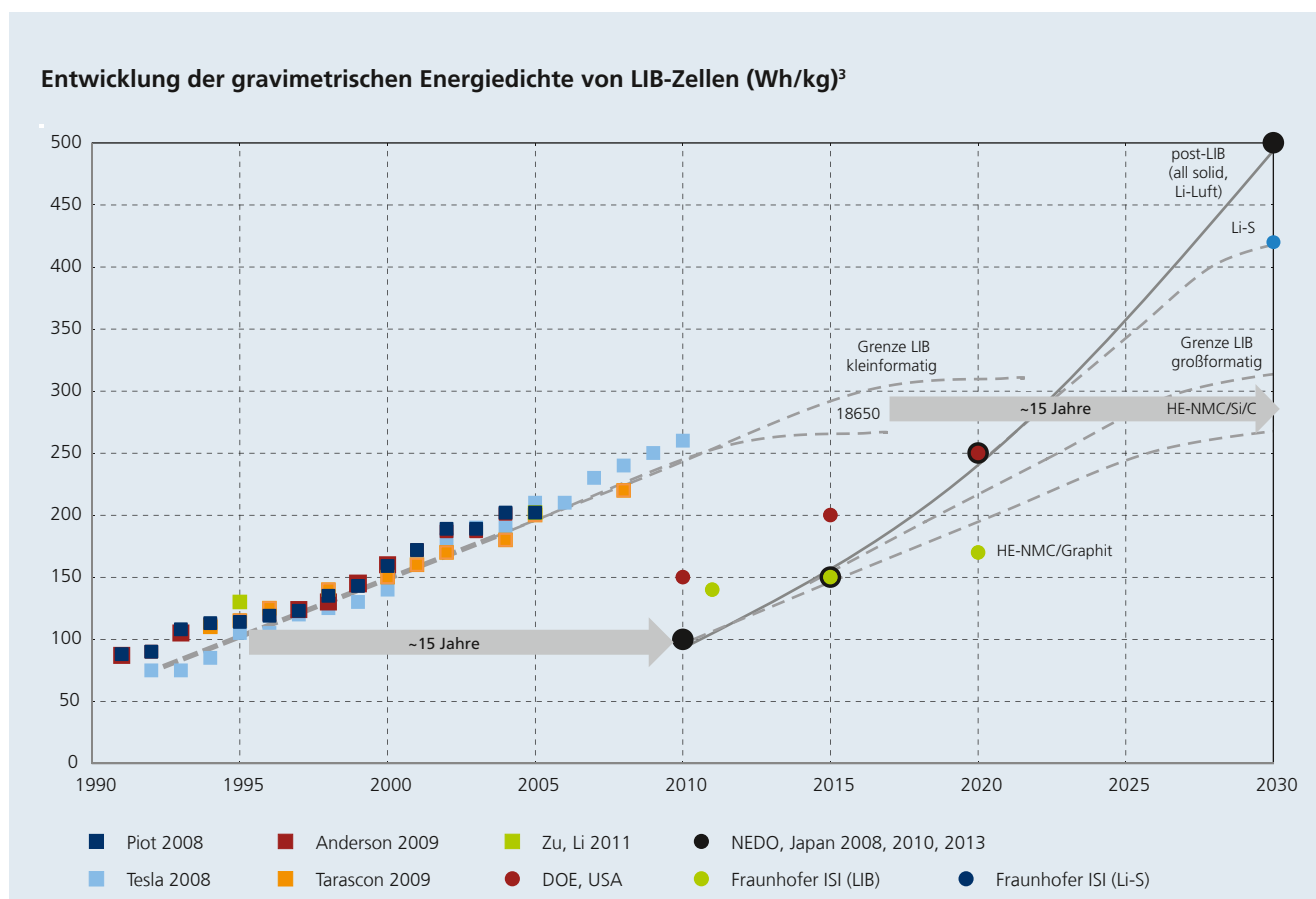
WEITERE ENTWICKLUNGSPOTENZIALE DER LITHIUM-IONEN-BATTERIE

Die Entwicklungen ebenso wie die gewonnenen Erfahrungen der letzten Jahre zeigen ganz deutlich, dass mit der Lithium-Ionen-Batterie (LIB) eine Plattformtechnologie zur Verfügung steht, deren Entwicklungspotenziale noch lange nicht ausgereizt sind.

Lernkurven aus der historischen Entwicklung kleinformatiger LIB (Batteriezellen für Konsumelektronikgeräte) zeigen auf, wie diese Potenziale in den nächsten 10 bis 20 Jahren auf großformatige Zellen übertragen werden können, wobei aber auch für kleinformatige Zellen (wie sie derzeit von Tesla Motors Inc./ Panasonic Corp. für den Einsatz in Elektrofahrzeugen optimiert werden) noch Optimierungspotenziale bestehen (sowohl durch Materialinnovationen wie für großformatige Zellen als auch durch Skaleneffekte in der Massenproduktion).

Zell-Kosten

Zellkosten für kleinformatige LIB liegen schon heute deutlich unter 200 €/kWh. Erwartungen von Tesla Motors Inc. (mit Inbetriebnahme der Tesla Gigafactory in Sparks, Nevada/USA) gehen von einer Kostenreduktion bis unter 100 €/kWh (bzw. 100 US\$/kWh) in den kommenden 5 bis 10 Jahren aus (dann vermutlich mit größeren Batteriezellen als 18650-Standardgröße). Die Herstellungskosten für großformatige Zellen dürften heute bei 200–250 €/kWh liegen, wenn auch aktuell z. T. von Zellherstellern mit OEM deutlich unter 200 €/kWh ausgehandelt werden (sogenannte OEM-Preise). Damit folgen die Lernkurven für großformatige Zellen den Entwicklungen der Kosten kleinformatiger Zellen mit 10 bis 15 Jahren Abstand und Zellkosten unter 100 €/kWh dürften um 2030 erreichbar sein.



Gravimetrische Energiedichte

Heute mit kleinformatigen Zellen erreichte gravimetrische Energiedichten bis 250 oder 270 Wh/kg könnten noch mit optimierter Zellchemie wie für großformatige Batterien auf über 300 Wh/kg gesteigert werden. Eine Übertragung auf großformatige Zellen dürfte mit rund 15 Jahren Abstand bis 2030–2040 erfolgen. Dann wäre die Entwicklung der LIB-Technologie nach 50 Jahren schließlich ausgereizt. Post-LIB wie z. B. Lithium-Schwefel (Li-S)-Batterien und Lithium-Feststoff (Li-Feststoff)-Batterien könnten schließlich (wie in der japanischen NEDO-Roadmap dargestellt)⁴ noch höhere gravimetrische Energiedichten erzielen und sich in diesem langfristigen Zeitraum zur Marktreife für die Elektromobilität entwickeln.

Volumetrische Energiedichte

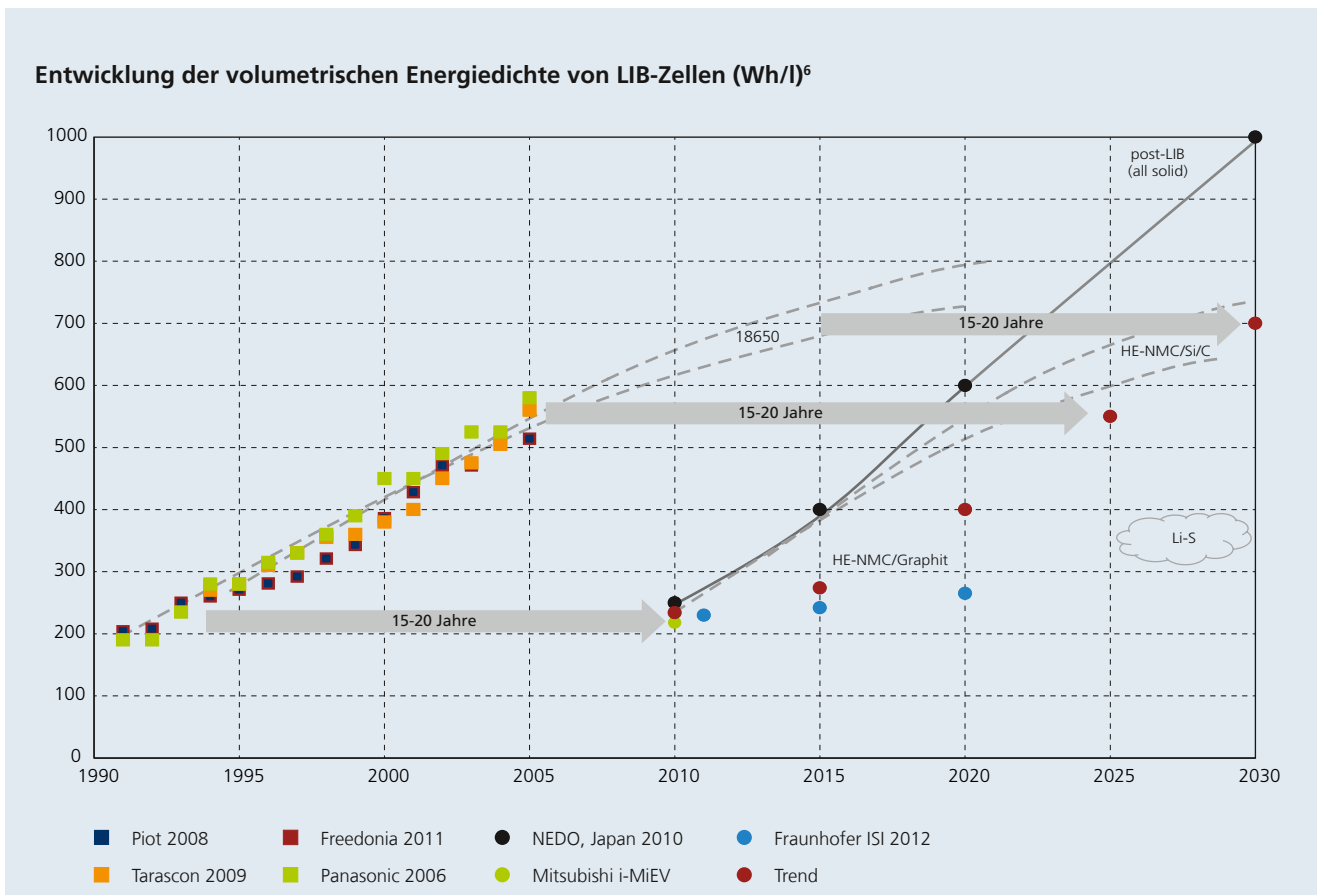
Heute mit kleinformatigen Zellen erreichte volumetrische Energiedichten um 700 Wh/l könnten noch bis 800 Wh/l erreichen. Diese Entwicklung dürfte in den kommenden 15 bis 20 Jahren (bis 2040) auf großformatige Zellen übertragen werden. Li-S weisen hinsichtlich der geringen volumetrischen Energiedichte Nachteile auf und könnten daher für den Einsatz in der Elektromobilität unattraktiver sein. Für Li-Feststoff sprechen daher mehr Parameter, wie die gravimetrische und volumetrische Energiedichte und Sicherheit.

KLEINFORMATIGE VS. GROSSFORMATIGE LIB

Der Vergleich der Entwicklung von klein- und groß-formatigen Zellen ist also nicht nur wegen des Ansatzes von Tesla Motors Inc. in BEV mit tausenden von Zellen und insgesamt 60–95 kWh Batteriekapazität für bis zu 500 km Reichweite interessant. Vielmehr lassen sich durch den Lernkurvenansatz die zukünftige Entwicklung bzw. Entwicklungschancen der LIB-Technologie besser abschätzen.

Die mit einem Investment von 4 bis 5 Milliarden US\$ im Aufbau befindliche Tesla Gigafactory von Tesla Motors Inc. (und Partnern bzw. Investoren) soll bis 2020 Batteriezellen im Umfang von 35 GWh für rund 500 000 BEV pro Jahr produzieren, wobei die zuvor gezeigten Kostensenkungen (siehe Lernkurven) erzielt werden sollen (in 2017 sollen die Kosten bereits um 30 Prozent gegenüber heute reduziert werden können). In 2016 soll die Tesla Gigafactory in Betrieb gehen können und von 2017 bis 2020 mit rund 6000 Mitarbeitern den Einstieg in den Massenmarkt für BEV von Tesla Motors Inc. ermöglichen.⁵

Die Betrachtungen aus dem Lernkurvenvergleich legen bereits nahe, dass Tesla Motors Inc./Panasonic Corp. einen technischen und wirtschaftlichen Vorteil bestenfalls in den kommenden 10 bis 15 Jahren aufrecht erhalten können, bis sich die Lücke bzw.



Nachteile heutiger großformatiger Zellen (bzgl. Kosten und Energiedichte) schließen dürfte. Betrachtet man alle Vor- und Nachteile dieses Ansatzes (Bewertung +/0/- aus Sicht kleinformatiger Zellen), so könnten Tesla-Fahrzeuge sogar bereits früher von Fahrzeugen mit großformatigen Batterien und hoher Reichweite Konkurrenz bekommen:

Energiedichte (+)

Typische LIB-Zellen in Elektrofahrzeugen haben heute Energiedichten von 150 bis 160 Wh/kg. 18650-Zelle hingegen liegen bei rund 250 Wh/kg bis max. 270 Wh/kg (optimierte Fahrzeugzellen). Dieses Gap wird für großformatige Zellen voraussichtlich bis 2030 geschlossen sein.

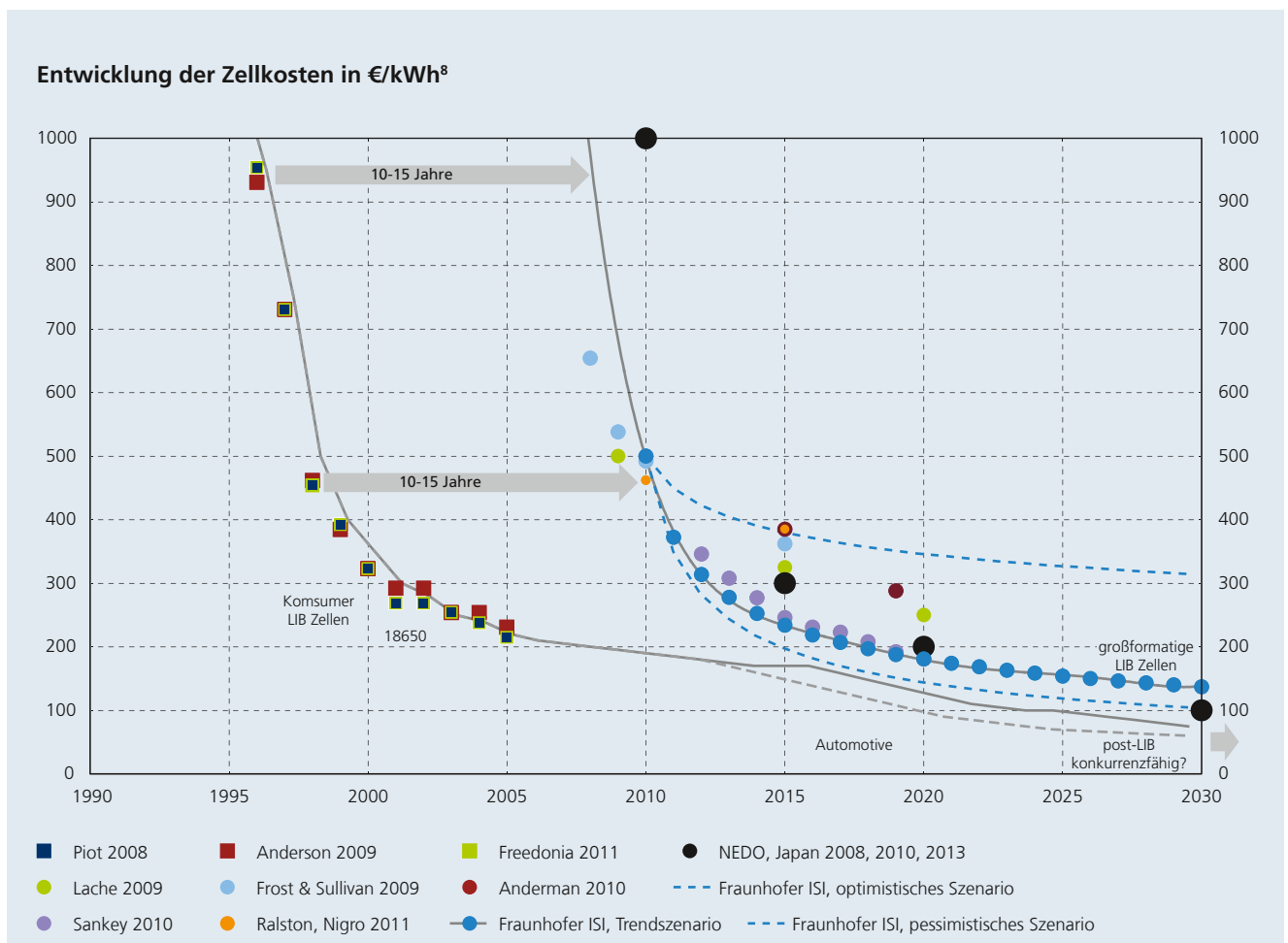
Kosten (+)

Da für kleinformatige (18650)-LIB-Zellen eine Produktionsplattform und langjährige Erfahrung und Wissen vorliegen, sind die Kostensenkungspotenziale hier als realistisch einzustufen. Ein Risiko stellen allerdings kurz- bis mittelfristig die aktuellen Überkapazitäten großformatiger Zellen dar, welche die asiatischen Zellhersteller teilweise veranlassen, Zellen sogar unter den von Tesla Motors Inc./Panasonic Corp. genannten Zellpreisen an inter-

essierte OEM zu verkaufen (siehe z. B. Preis von LG Chem Ltd. an General Motors Corp.⁷). Dieses Risiko besteht gerade im Zeitraum zwischen 2015 und 2020, in welchem die Tesla Gigafactory in Betrieb geht und sich die globale Zellnachfrage für Elektrofahrzeuge noch weiter entwickeln muss. Jenseits 2020 und mit einem steigenden Markthochlauf könnten aber großformatige Zellen bereits deutlich konkurrenzfähiger werden. Allerdings sind die Konzepte von Tesla Motors Inc. und der weiteren OEM mit deutlich kleineren Batteriekapazitäten (BEV mit rund 20–30 kWh) heute nicht sehr unterschiedlich und die Nachfrage heutiger „early adopter“ ergibt sich weniger über den Zellpreis als vielmehr die Automobilmarke und das jeweilige Konzept. Jedoch zeichnen sich bereits Ankündigungen von BEV-Konzepten mit 500 km Reichweite bis 2020 ab. Der Kostenvorteil des Tesla-Ansatzes ist daher eher ambivalent zu sehen.

Anpassungen (0) an automotive Anwendungen

Die kleinformatigen (18650) Batterien sind keine Konsumer-Gerätezellen mehr, sondern an die Anforderungen von Elektrofahrzeugen z. B. hinsichtlich einer sicheren Zellchemie und weiterer Parameter angepasst. Allerdings bestehen hier auch für großformatige Zellen ebenfalls keine Nachteile mehr.



Batteriemanagement (-)

Die Batteriepacks erfordern heute mit rund 7000 Zellen einen zusätzlichen Aufwand bzgl. des Batteriemagements, welcher für eine geringe Anzahl von großformatigen Batterien deutlich unkomplizierter ist. Allerdings dürften Zellen in der Tesla Gigafactory in einem größeren Format (20650⁹ bzw. 20700¹⁰) gefertigt werden und damit die Anzahl der Zellen bereits z. B. um die Hälfte der Zellen reduziert werden.

Begrenzte Flexibilität des Konzepts bzw. Design-Möglichkeiten (-)

Bei einer großen Anzahl von Batteriezellen funktioniert der Einsatz von kleinformatigen Zellen, solange die Belastung einer einzelnen Zelle begrenzt ist. Allerdings ist dieser für kleinere Batteriegrößen (z. B. 20–30 kWh) nicht mehr geeignet und damit die Auslegung des Batteriedesigns von Elektrofahrzeugkonzepten eingeschränkt.

Lebensdauer (-)

Die Lebensdauer und Garantie (8 bis 10 Jahre und 100 000 km für die 18650-Zellen z. B. im Tesla Model S) sind deutlich geringer als bei großformatigen Zellen (z. B. 10 bis 15 Jahre im BMW i3). Großformatige Zellen zeigen hier insgesamt typischerweise bessere Lebensdauer-Charakteristika (ADAC 2014¹¹).

Vom Premium-Segment zum Volumenmarkt (-)

Bisher hatte Tesla Motors vor allem das Premium-Segment anvisiert. Im Volumenmarkt werden andere Anforderungen an die Kostenstruktur gestellt, was eine große Herausforderung für ein neues Unternehmen wie Tesla Motors Inc. darstellen kann.

Damit sind die einzigen und eigentlichen Vorteile des Tesla-Konzepts heute in der Energiedichte und Kosten der Zellen begründet.

Die ebenfalls in den Lernkurven eingetragenen Abschätzungen der japanischen NEDO-Roadmap (diese macht grundsätzlich von dem Lernkurvenansatz für LIB Gebrauch, löst jedoch darin angenommene Technologiewechsel zu Post-LIB nicht weiter auf) zeigt, dass mit dem Fortschritt in der Entwicklung großformatiger Batterien zwischen 2020 und 2030 mit einem Aufschluß und voller Konkurrenzfähigkeit von in der Reichweite optimierten Konzepten (mit dem Konzept von Tesla Motors Inc.) zu rechnen ist.

Ein detaillierter Vergleich von Kosten-optimierten (20–30 kWh) BEV geringerer Reichweite und Reichweite-optimierten (von 20 kWh bis hin zu 60 kWh sukzessive angepasster) BEV mit stetig erhöhter Reichweite wird in der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ vorgenommen und ebenfalls dem Konzept von Tesla Motors Inc. gegenüber gestellt.

Neben den hier beschriebenen Entwicklungsperspektiven von LIB und deren Leistungsparametern stellt sich jedoch die Frage, welche Anforderungen seitens einzelner Fahrzeugkonzepte wie HEV, PHEV und BEV an die Batterietechnologien heute und zukünftig bestehen. Daher ist es Gegenstand dieser Roadmap, die zu erwartenden Entwicklungspfade und Einsatzchancen von LIB und anderen Batterietypen für den zukünftigen Einsatz in Elektrofahrzeugen aufzuzeigen.

Batterie Roadmap von NEDO, Japan (NEDO 2013)¹²

(Auszug mit der auf Energiedichte, für BEV optimierten Batterien)

Zeit	2011	2020	2030	>2030
Energiedichte Wh/kg	60–100	250	500	700
Leistungsdichte W/kg	330–600	<1500	<1500	<1500
Kosten in €/kWh (100¥=1€)	700–1000	<200	ca. 100	ca. 50
Lebensdauer/ Jahre	5–10	10–15	10–15	10–15
Zyklen	500–1000	1000–1500	1000–1500	1000–1500
Beispiel BEV				
Reichweite km	120–200	250–350	500	700
Batteriegewicht kg	200–300	100–140	80	80
Batteriegröße kWh	16–24	25–35	40	56
Wertschöpfung Batterie/	40–60	25–40	20–25	<20
BEV in Prozent				

GESAMT-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030

ZEIT →		2015			KURZFRISTIG	MITTELFRISTIG		
ANWENDUNGEN & PRODUKTE	BEV	Problemlösung/Markteintritt	LIB (NMC, NCA, LFP, ...) („Generation 2“)+		Konsolidierung (NMC), weitere Optimierung (Ni-reich, Co-reduziert) und Übergang zu nächster Generation („Generation 3“)			
	PHEV		LIB (NMC, NCA, LFP, ...) („Generation 2“)+		Konsolidierung (NMC), weitere Optimierung (Ni-reich, Co-reduziert) und Übergang zu nächster Generation („Generation 3“)			
	HEV		NIMH und LIB (NMC, NCA, LFP, ...) („Generation 2“)+		Zunehmender Einsatz von LIB (50-90 Prozent bis 2025/2030)			
	Verbesserung durch Technologiewechsel		Evolutionäre Entwicklung		Optimierte LIB: Kostenreduktion bis 2020 (150-200 €/kWh Zelle, Erhöhte Energiedichte (Gap zu Energiedichte in Konsumel.-Zellen)			
	Disruptionspotenzial							
EIGENSCHAFTEN VS. ANFORDERUNGEN	Energiedichte	System (grav.; in Wh/kg)	70-110	60-80	30-50	Problemlösung/Anforderung zu lösender Schlüsselparameter (Systemebene)		
	Leistungsdichte	System (grav.; in W/kg)	300-800	500-1.500	1.000-2.000			
	Lebensdauer	Kalendarisch (Jahre)	8-10	8-10	8-10			
		Zyklisch (Zyklen)	1.000-2.000	4.000-5.000	15.000-20.000			
	Umgebungsbedingungen	Leist.dichte bei niedriger Temp. von -20 °C	60-120 W/kg	100-300 W/kg	200-400 W/kg			
	Sicherheit	EUCAR-Level	≤4	≤4	≤4			
	Kosten	System	300-600 €/kWh	400-700 €/kWh	800-1.200 €/kWh			
	Produktion	Verfahren/Herstellung/Massenprodukt.	Referenzsystem (LIB) stellt Plattformtechn. dar (für evol. Entwicklungen keine grundl. Änderungen der Prod.technik nötig)					
TECHNOLOGIEN	Technologien (Systemebene, ohne anwendungsspezifische Definition der erforderlichen Parameter)	Li-basiert	Referenzsystem: LIB (4 V)	Li-Polymer	4,3 V LIB	4,4 V LIB	Li-Legierung/C-Komposit	
		Brennstoffzelle	PEM-FC Nafion/Pt	700 bar-Tank	Stack + System + H ₂ -Tank 140 kWh			PEM-FC-H ₂ Pt-reduziert
		Nicht Li-basiert	Pb	HT-Systeme z. B. NaNiCl ₂	NiMH			

2020	LANGFRISTIG	2030	>2030
2020-2025 HE-NMC (Δ 2-3 Jahre)	≥2025 4,4 V LIB (Δ 2-3 Jahre)	<<2030 Li-Leg./C-Komp. (Δ 2-3 Jahre)	2035? Li- Feststoff
2020-2025 HE-NMC (Δ 2-3 Jahre)	≥2025 4,4 V LIB (Δ 2-3 Jahre)	~2030 Li-5 (Δ 5-8 Jahre)?	>>2035? 5 V LIB
(„Generation 2/3“)	≥2025 4,4 V LIB (Δ 2-3 Jahre)	~2030 Li-Leg./C-Komp. (Δ 2-3 Jahre)	2035? Li- Feststoff
200-250 €/kWh System) zunehmend geschlossen	HE/HV-LiB (ausreizen der LiB-Technologie) Kostenreduktion bis ~100 €/kWh Zelle, <150 €/kWh System (bis 2030) Energiedichte 250-300 Wh/kg Zelle, 200-250 Wh/kg System (bis 2030)		5 V LiB >Energiedichte (Kapaz.?) Engineering, da weniger Zellen
	Li-S Red. Kosten (<200 €/kWh Zelle, ~250 €/kWh Syst.?) (2030) Energiedichte (>400 Wh/kg Zelle, >300 Wh/kg Syst.?)		Li-Feststoff >>Energiedichte, Sicherheit, Kosten? (Dickschichtverf.)

		Li-S-System kommt nie		
		Li-S-System kommt nie		
		Li-S begrenzte Leistungsdichte		
	LIB (4,4 V) (NMC)	2025 Li-S-System		<5 V (4,6 V?)
	LIB (4,4 V) (NMC)			<5 V (4,6 V?)
	LIB (4,4 V) (NMC)			<5 V (4,6 V?)
>2020 Li-S-System 1.000 Zyk.	LIB (4,4 V) (NMC)	Li-Legierung/ C-Komposit 2025	Li-Legierung/ C-Komposit <2030	<5 V (Ideen)
	LIB (4,4 V) (NMC)			<5 V (Ideen)
	LIB (4,4 V) (NMC)			<5 V (Ideen)
	LIB (4,4 V) (Co red., Kosten!)			<5 V (Ideen)
	LIB (4,4 V) (Co red., Kosten!)			<5 V (Ideen)
	LIB (4,4 V) (Co red., Kosten!)			<5 V (Ideen)
		2025 Li-S-System	Li-Feststoff (Schichtenstab., Temp.-Best.)	
			Li-Feststoff (Schichtenstab., Temp.-Best.)	
			Li-Feststoff (Schichtenstab., Temp.-Best.)	
Li-S	Li-Polymer (Elektrolyt)		5 V LiB	Li-Luft (wieder aufladbar)
Li-Feststoff (nicht polymer)				
REFC mit Flüssig- brennstoff		H ₂ -speichernde organische Materialien		
				Zn-Luft (wieder aufladbar)
				Al-Luft/Al (wieder aufladbar)
				Mg-Luft/Mg (wieder aufladbar)



ENERGIESPEICHERTECHNOLOGIEN

Als Ausgangspunkt werden die auf Systemebene (Technologie-Angebotsseite und noch nicht für die anwendungsspezifischen Anforderungen optimiert) verorteten Energiespeichertechnologien betrachtet, welche aktuell (Stand der Technik) bzw. potenziell zukünftig in Elektrofahrzeugen eingesetzt werden können (vgl. „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“). Die Energiespeichertechnologien werden in drei Kategorien eingeteilt:

- Li-basiert, um die Weiterentwicklung der bereits heute eingesetzten Fahrzeugbatterien (insbesondere in PHEV und BEV) zu betrachten,
- Brennstoffzelle, um die Komplementär- bzw. Konkurrenztechnologie und das Konzept der Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) vergleichend einzubeziehen (Letztere werden in der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ tiefergehend bewertet),
- Nicht Li-basierte Energiespeicher, welche z. B. als Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) in HEV oder Blei-Säure-Batterien (Pb) in Schwellenländern bzw. bestimmten Fahrzeugkonzepten heute noch Einsatz finden.

Li-basiert

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) (4V mit NMC-, NCA-, oder LFP-Kathode und Graphit-Anode) stellen weiterhin den Stand der Technik und die Referenztechnologie für xEV (HEV, PHEV und BEV) dar. Lithium-Polymer-Batterien (Li-Polymer) werden z. B. von Bolloré Group/BatScap im Modell „Bolloré Bluecar“ eingesetzt. Hochvolt (HV)-LIB, Lithium-Feststoff (Li-Feststoff)-, Lithium-Schwefel (Li-S)- bis Lithium-Luft (Li-Luft)-Batterien sind in der „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ diskutiert worden und hier (mit Einschränkung der weniger optimistischen HV-Entwicklung) verortet.

Generell gilt: Für inkrementell verbesserte Batteriesysteme wie Hochenergie (HE)-LIB oder HV-Entwicklungen mit 4,2/4,3/4,4 Volt dauert es nicht so lange, Fortschritte zu erreichen. Für die Fahrzeugintegration bzw. größere Entwicklungen in der Batterietechnologie sind aber ggf. 2 bis 3 und bei produktionstechnisch

offenen Fragen möglicherweise bis zu 8 Jahre für eine produktionstechnisch und seriell umgesetzte Fahrzeugintegration einzuplanen.

Metall-Luft-Batteriesysteme auf der Basis von Aluminium, Lithium, Magnesium oder Zink sind bereits deshalb nur noch unter >2030 verortet und dürften (falls überhaupt) vermutlich nicht vor 2040–2050 in einem Fahrzeug zu erwarten sein.

Fortschritte dürften hinsichtlich Li-Luft am ehesten erreicht werden, noch vor Aluminium-Luft, Magnesium-Luft und Zink-Luft, allein aufgrund des hohen personellen Aufwands, viele Arbeitsgruppen arbeiten an der Li-Luft. Da die Systeme allerdings nur elektrochemisch wiederaufladbar Sinn machen (spezifische Transportfahrten zur Reduktion und Wiederaufladung in großem Maßstab sind nicht denkbar), sind und bleiben sie bezgl. der Elektromobilität ein Thema der Grundlagenforschung.

Brennstoffzelle

Die PEM-Brennstoffzelle mit 700 bar-Tank (Wasserstoffspeicher) ist Referenztechnologie für FCEV.

Bei den Brennstoffzellenfahrzeugen kommen auch Range Extender bis 2020 zum Einsatz (REFC mit Flüssigbrennstoff). Dies weniger, weil mehr Reichweite gefordert wird, sondern um Verbraucher zu beruhigen und hohe/versprochene Reichweiten zu garantieren. Als Flüssigbrennstoffe kommen Methanol oder andere Alkohole in Frage.

Herausforderungen entstehen durch die hohen Herstellungskosten für die Brennstoffzelle (Platinreduktion ist daher weiterhin FuE-Gegenstand) und die noch fehlende „grüne“ Wasserstoffinfrastruktur. Auch der weiterhin als kostenintensiv bewertete Aufbau einer Tankstelleninfrastruktur wird als ein Hemmnis gesehen. 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 Brennstoffzellen mit Wasserstoffspeicherung entwickeln werden.

H₂-speichernde organische Materialien sind zwar noch nicht weit entwickelt, könnten aber langfristig eine Rolle spielen.

Nicht-Li-basiert

NiMH werden weiterhin in HEV eingesetzt und Blei-Säure-Batterie (Pb) sind heute und kurzfristig weiterhin im Einsatz in Traktionsanwendungen (z. B. in Entwicklungsländern, dort NICHT als Starter-Batterie).

Bei Nicht-Lithium-basierten Batterietechnologien sind auch die Hochtemperatur-Systeme erfasst, z. B. NaNiCl₂ 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 Batterietypen in Anwendungen der Elektromobilität bald verschwinden bzw. ggf. in Nischenanwendungen verbleiben.

Anforderungen an die Leistungsparameter

Die (Mindest-)Anforderungen an die Leistungsparameter sind für BEV (>20 kWh-Batterie), PHEV (5–20 kWh) und HEV (<3 kWh) in der Roadmap verortet. Diese sind durch die heutige Referenztechnologie erfüllt, eine Verschlechterung in einzelnen Parametern ohne eine deutliche Verbesserung in Schlüsselparametern wie den Kosten und der Energiedichte ist daher nicht für diese Anwendungen akzeptabel. Technologien mit Substitutionspotenzial müssten daher alle Mindestanforderungen erfüllen bzw. eine zusätzliche Verbesserung erzielen.

Alle Angaben gelten auf Systemebene:

Für die gravimetrische Energiedichte sind die gesamte (größere Wh/kg-Angabe) und die nutzbare (kleinere Angabe) Energiedichte angegeben. Die volumetrische Energiedichte wird nur qualitativ diskutiert. Gleiches gilt für die Leistungsdichte.

Die kalendarische Lebensdauer ist für alle Elektrofahrzeug-Typen mit 8 bis 10 Jahren angegeben. Wünschenswert wäre eine Verbesserung auf 15 oder maximal gar 20 Jahre, um an die Nutzungsdauer heutiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor heranzukommen. Dies erhöht die Anforderungen an die in der Roadmap verorteten Technologien sogar noch weiter (hier wurde nach 8 bis 10 Jahren Mindestanforderung bewertet). Bzgl. der

Zyklenzahl sind die Anforderungen an die zyklische Lebensdauer mit der jeweiligen Entladetiefe verortet: HEV 15 000–20 000 bei 2 bis 8 Prozent Entladetiefe, PHEV 4000–5000 bei 80 Prozent Entladetiefe, BEV 1000–2000 bei 80 Prozent Entladetiefe. Das Erreichen des unteren Werts (z. B. 1000 Zyklen für BEV) gilt als frühester Zeitpunkt eines Markteintritts.

Den Umgebungsbedingungen wird mit der Angabe der Leistungsdichte bei niedriger Temperatur von -20°C Rechnung getragen. Sie liegt etwa um den Faktor 5 unter der normalen Leistungsdichte eines Elektrofahrzeug-Typs, HEV mit 200–400 W/kg, PHEV mit 100–300 W/kg und BEV mit 60–120 W/kg.

Für das Sicherheitsranking wird noch ein Testverfahren auf Systemebene benötigt, auf Zellebene gilt das EUCAR-Level als ausreichend. Die Angabe des Wertes von „≤4“ für alle Elektrofahrzeug-Typen bedeutet, dass die Batteriezellen kein Feuer oder Flammen entwickeln dürfen, sie dürfen nicht brechen und nicht explodieren. Akzeptabel ist auf diesem Level noch ein Gewichtsverlust bzw. das Auslaufen des Elektrolyten (bzw. Lösungsmittel und Salz) von mehr als 50 Prozent, die sogenannte Entgasung (engl. „venting“).

Die Kostenangaben beziehen sich auf die Batteriekosten auf Systemebene und ergeben mit der Batteriegröße (kWh) im Elektrofahrzeug den abgeschätzten Kostenanteil der Batterie (wie sie OEM an den Endkunden weitergeben). Tatsächlich kaufen OEM in der Regel Batteriezellen ein und erledigen die Modul-/Systemherstellung zunehmend intern. Die Zellkosten sind in den letzten Jahren enorm gesunken (sicherlich gekoppelt an die aktuell bestehenden Überkapazitäten und noch zu geringe Nachfrage nach Elektrofahrzeugen), und liegen aktuell teilweise deutlich unter 200 €/kWh. Diese Entwicklung wird sich bei einer Massenproduktion durch Skaleneffekte noch fortsetzen, weshalb eine zukünftig potenzielle, disruptive Technologie mit diesen deutlich reduzierten Kosten konkurrieren müsste. Noch vor der Energiedichte sind daher die Kosten der absolute und entscheidende Schlüsselparameter, ob es jemals eine andere Batterietechnologie neben der LIB in einem Elektrofahrzeug geben kann.

Um neben den Leistungsparametern bis auf Systemebene die Lücke zur Fahrzeugintegration der Batterie zu schließen, ist die produktionstechnische Verfügbarkeit bzw. Realisierbarkeit ein ganz zentrales Kriterium dafür, ob neben dem Stand der Technik eine Energiespeichertechnologie zu einem Substitut werden kann. Mit der Kategorie „Verfahren/Herstellung/Massenproduktion“ wird daher unterschieden, ob eine Plattformtechnologie vorliegt oder ob noch grundlegende Fragen und Herausforderungen der Produktion zu klären sind.

EIGENSCHAFTEN VS. MINDESTANFORDERUNGEN

Ausgehend von dem sich entwickelnden Angebot der potenziellen Energiespeicherlösungen für Elektrofahrzeuge und unter Einbezug der Mindestanforderungen der jeweiligen Fahrzeugkonzepte ist nun zu bewerten, welche Leistungsparameter heute noch den Einsatz in einem Elektrofahrzeug verhindern und wann entsprechende Schlüsselparameter gelöst werden können.

Daher werden in der Roadmap nur Parameter diskutiert, welche heute unter den Mindestanforderungen im jeweiligen Fahrzeugkonzept liegen (praktisch sind dies engl. „Red brick walls“, Abkürzung RBW). Parameter, welche kein Problem darstellen, werden nicht diskutiert.

Allerdings wird in der Roadmap unter „Anwendungen & Produkte“ (Verbesserung durch Technologiewechsel) der besondere Mehrwert einer Technologie gegenüber dem heutigen/zukünftigen Stand der Technik diskutiert, also worüber sich ein Technologiewechsel noch gegenüber der optimierten LIB-Technologie differenzieren könnte.

Der Übergang von einer zur anderen Technologie wird aber erst dann erfolgen, wenn das gesamte Spektrum der Leistungsparameter inkl. Produktion erfüllt ist. Und auch dann kann die Fahrzeugintegration (je nach Veränderung der Technologie) noch zu einer Verzögerung von 2 bis 3 oder mehr Jahren führen. Zwischen dem unten in der Roadmap beschriebenen Technologie-Angebot und dem tatsächlich Einsatz und Markteintritt (und damit erst Start einer Technologiediffusion) können somit durchaus 10 bis 15 Jahre oder gar mehr liegen.

Referenzsystem: LIB (4V)-System

Das LIB-Referenzsystem ist in der Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030 hinsichtlich der Leistungsparameter quantifiziert und erfüllt die heutigen Bedingungen der Elektrofahrzeuge. Vielmehr haben sich z. B. die Kosten dynamischer entwickelt und die Entwicklung der Energiedichte ist auf die HE-LIB zu beziehen (anstelle HV). Die HV-Entwicklung (beginnend mit einer 4,4V-LIB) verhindert bzgl. Lebensdauer, Sicherheit und Kosten heute noch den Einsatz in der Elektromobilität.

4,3V-LIB bzw. 4,4V-LIB-System

4,3V- und 4,4V-LIB liegen auf Systemebene vor (Laborstatus: 4,35V), mit NMC (Co-reduzierten Kathoden) wird erwartet, dass parallel zur HE-Entwicklung die Kosten reduziert werden und ab 2020 auch Probleme der Lebensdauer und Sicherheit gelöst werden können. Produktionstechnisch gibt es hier keine Unterschiede zur HE-LIB, so dass 4,4V-LIB ab 2025 bis 2030 marktreif in Elektrofahrzeugen erstmals eingesetzt werden könnten.

Einen „Show-stopper“ stellt allerdings die Suche nach einem passenden HV-Elektrolyten dar. Wenn ein solcher Elektrolyt gefunden werden könnte, wäre das System denkbar bzw. die Erfüllung der notwendigen Leistungsdaten erreicht. HV-stabile Festkörper-Elektrolyte wären eine Lösung, welche schon seit einigen Jahren erforscht wird und ggf. mittelfristig (bis 2020) zur Verfügung stehen könnte. Neben dem Festkörper-Elektrolyt spielen aber auch andere Themen wie die Ableiter-Korrosion eine Rolle, weshalb man die Batterietechnologie auf Systemebene und integriert im Fahrzeug nicht zu früh erwarten sollte.

Neben der Kostensenkung durch die Reduktion des Kobaltanteils kann auch ein zunehmendes Recycling helfen, die Kosten zu reduzieren. Haupteinfluss werden aber bei erhöhter Nachfrage die Massenproduktion und damit verbundene Skaleneffekte haben.

5V-LIB

Die Entwicklung einer 5V-LIB wird sehr kritisch gesehen, da unklar ist, welches Oxidationsmittel eingesetzt werden kann, ohne die Zelle strukturell zu zerstören. Eine Stabilisierung mit Fluor wird ausprobiert, funktioniert aber nicht, da Fluor im Prinzip eher eine Molekülverbindung eingeht. Damit leidet die Leitfähigkeit, aus dem Periodensystem der Elemente bietet sich aber keine weitere Lösung an. Das Maximum liegt im Moment bei 4,6V-LIB-Zellen, die aber in ihrer Lebensdauer sehr stark begrenzt sind. Anzudenken wären vor allem Nickel-Mangan-Spinelle oder eine neue Klasse von Lithium-Kobalt-Phosphat-Zellen (ggf. nicht mit 5V, aber 4,7V). Das heißt, dass Ideen für den Zellaufbau durch-

aus noch bestehen – hinsichtlich eines passenden Elektrolyten ist jedoch keine Lösung bzw. auch nur eine Strategie dahingehend zu sehen, obwohl sehr viele Materialien getestet wurden.

Der größte Vorteil in der HV-Entwicklung besteht in der Möglichkeit zur Einsparung von Zellen und könnte daher für das Engineering der Batterien und schließlich dem Fahrzeug Vorteile bringen. Die Energiedichte wäre entsprechend der Spannung höher, allerdings könnte sich die Batteriekapazität verschlechtern.

5V-LIB-Systeme dürften nach heutigem Stand nicht vor 2035 zu erwarten sein, vermutlich eher jenseits 2040.

HE-LIB (NMC, Li-reich, Co-reduziert)

Statt eines HV-Pfads zeichnet sich vielmehr die Entwicklung einer optimierten HE-LIB ab:

Hochkapazitäts-Kathodenmaterialien in der Größenordnung von 260 oder 270 mAh pro Gramm dürften bis 2020 entwickelt sein. Sie sind heute sowohl bzgl. der geforderten kalendarischen als auch zyklischen Lebensdauer noch nicht marktreif.

Neue Anodenkonzepte wie Silizium-Kohlenstoff (Si/C)-Komposite sind höchstens für PHEV und BEV relevant, für HEV aufgrund der Einschränkungen bzgl. der Zyklenzahl nicht. Li-Legierung/C-Komposit-Batteriesysteme könnten bis 2025 die von BEV geforderte zyklische Lebensdauer erreichen, und bis 2030 auch die für den Einsatz in PHEV, die kalendarische Lebensdauer wäre dann zu prüfen.

Mit der Kombination der HE-NMC-Kathoden (von NMC:111 bis NMC:811) und Si/C-Komposit-Anoden (maximal 10 bis 20 Prozent Si-Anteil) werden in der Energiedichte optimierte großformatige LIB erwartet, welche bis 2030 mit Energiedichten heutiger kleinformatiger LIB-Zellen (>250 Wh/kg) aufschließen können und jenseits 2030 die Grenzen der LIB-Technologie (um 300 Wh/kg oder mehr) ausreizen dürften.

Trotz der aktuell international großen Konzentration auf NMC-basierte Kathodenmaterialien sollten aber auch Entwicklungspotenziale anderer Materialien wie der weiterhin in Tesla Motors Inc./Panasonic Corp.-Zellen verwendeten NCA-Kathoden (also insgesamt Nickel-basierte Systeme) im Auge behalten werden.

Li-S

Um 2020 dürfte die Li-S-Zelle mit rund 1000 Zyklen Lebensdauer zur Verfügung stehen. Die Anforderungen an die kalendarische Lebensdauer (insbesondere bei erhöhten Temperaturen) dürften

aber weiterhin eine Herausforderung darstellen, welche ggf. erst nach 2025 erfüllt sein werden:

Die Leistungsdichte von 250 W/kg (Systemebene, vgl. Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030) ist jedoch für den Einsatz in einem PHEV nicht ausreichend (erst recht nicht für einen HEV). Daher kommt die Li-S-Technologie (wenn überhaupt) nur für einen BEV in Betracht. Die Leistungsdichte (und auch die Energiedichte) wird vor allem volumetrisch ein Problem darstellen und könnte den Einsatz in einem BEV ebenfalls verhindern.

Die gravimetrische Energiedichte (>400 Wh/kg, auf Zellebene) hingegen ist sehr vielversprechend und der Hauptgrund für die Aufmerksamkeit für Li-S. Nach heutiger Einschätzung schwinden diese Vorteile jedoch bereits auf Systemebene (evtl. >300 Wh/kg). Auch die optimierte LIB-Technologie dürfte bis 2030, wenn die Li-S-Technologie den heutigen Mindestanforderungen an BEV-Batterien genügen könnte, diese Energiedichten erreichen. Zusätzlich schwinden die Vorteile der Li-S hinsichtlich der Kosten (evtl. <200 €/kWh), da für die optimierte HE-LIB-Technologie deutlich vor 2030 starke Kostenreduktionspotenziale erwartet werden.

Zudem stellt sich für die Li-S-Technologie die noch offene Frage einer (Massen-)Produktion, welche vermutlich nicht so schnell aufzubauen bzw. zu übertragen wäre, wie mit klassischen, bekannten LIB-Systemen.

Für Li-S lässt sich aus heutiger Sicht noch wenig zu den vielleicht notwendigen Veränderungen im Produktionsprozess sagen. Die Technologieentwicklung und Materialforschung sowie der Aufbau der Batteriezellen ist noch zu wenig konkret bzw. vielfältig, um klare Aussagen treffen zu können. Bemühungen gehen dahin, den Produktionsprozess so wenig wie möglich zu verändern und FuE in diesem Sinne zu betreiben. Jedoch erfordern die bei Li-S „dickeren“ Elektroden in jedem Fall Anpassungen im Produktionsprozess, sodass dieser nicht mehr mit den bereits existierenden Produktionsmitteln bzw. der zugrunde liegenden Produktionstechnologie vollständig kompatibel wäre. Es würden zudem neue, hohe Investitionen nötig werden. Weiterhin müssten Li-S-Zellen für ggf. zwei Jahre durch eine Produktvalidierung laufen und Pilotfertigungen müssten konzipiert werden (z. B. 3 bis 4 Jahre), so dass sich eine Verzögerung zwischen dem im Labormaßstab fertigen System und dem für die Fahrzeugintegration in Serie zur Verfügung stehenden System vermutlich mit einer Zeitdauer von 5 bis 8 Jahren ergäbe. Im Gegensatz hierzu ist bei bestehenden Produktionsanlagen für Technologieanpassungen (z. B. HE-LIB oder 4,4V-LIB-Systeme etc.) mit einer Verzögerung von ggf. 2 bis 3 Jahren zu rechnen.

Li-Polymer

Das Batteriesystem mit Polymer-Elektrolyt auf Basis von Lithium-Metall (Metall als Anodenmaterial, deshalb Abkürzung LMP-Batterie) hat keinen deutlichen Vorteil gegenüber einer LIB. Zwar wurde in den letzten Jahren typischerweise der sicherheitstechnische Vorteil angeführt, jedoch stellt die Sicherheit bei den aktuell in Elektrofahrzeugen eingesetzten LIB keine Schwachstelle bzw. Problem dar. Einzig die Firma BatScap aus der Bolloré Group setzt mit dem Modell „Bolloré Bluecar“ heute noch auf diese Batterietechnologie.

Unter den mittlerweile rund 5000 verkauften Elektroautos sollen bereits 25 Fahrzeuge in Brand geraten sein, teilweise vermutlich aufgrund von Vandalismus.¹³ Die Aussagen bzgl. der Batteriesicherheit werden aber bei der LMP-Batterie durchaus kontrovers diskutiert. Die Ursache für den Brand (insofern auf die Batterie zurückzuführen) wird allerdings nicht genannt (Vermutungen gehen hin zu der Dendriten-Bildung in der Batteriezelle).

Neben der umstrittenen Sicherheit ist auch die Betriebstemperatur der Batterie im Bereich von circa 60°C herausfordernd und erschwert das Handling. Die Energiedichte ist dadurch zwar etwas höher, jedoch auch der einzige verbleibende Vorteil. Ein neuer Polymer-Elektrolyt mit höherer Leitfähigkeit ist nicht in Sicht und dessen Entwicklung könnte mindestens 10 Jahre dauern. Die Batterietechnologie wird somit für den Einsatz in Elektromobilen als nicht relevant eingestuft. Die technische Umsetzung ist zwar kein Problem, jedoch sind erhebliche Fragen z. B. bzgl. der Sicherheit noch unbeantwortet.



Li-Feststoff

Lithium-Feststoff-Batterien (Li-Feststoff) sind speziell unter Verwendung von Keramiken besonders hitzebeständig und können selbst bei Temperaturen um 100°C arbeiten. LIB oder LMP-Batterien fangen bei solchen Temperaturen bereits an zu brennen, bzw. die flüssigen Bestandteile beginnen zu kochen. Somit erspart die Li-Feststoff nicht nur aufwändiges Kühlen und reduziert den Platzbedarf bei gleicher oder höherer Leistung, sondern wird auch dem Anspruch an die für Elektromobile geforderte hohe Sicherheit gerecht.

Li-Feststoff (engl. „All solid state batteries“) haben in den letzten Jahren deutlich an Aufmerksamkeit gewonnen. Als (gut funktionierende) Mikrobatterien gibt es Li-Feststoff schon heute. Als „Show-stopper“ für großformatige Zellen gelten vor allem die Herstellungsverfahren.

Unter Laborbedingungen lassen sich Materialien und Zellen mit geforderten Energiedichten sowie Lebensdauern zwar realisieren. Jedoch stellen die dünnen Schichten für die Produktion (Instabilität durch Volumenausdehnung bei Lithium-Ein- und Ausbau sowie die Herausforderung, sie in angemessener Zeit zu produzieren) und die Temperaturbeständigkeit noch Hindernisse dar. Ein einziger Defekt reicht aus, und es kann zum Kurzschluss durch ein „Leck“ in den dünnen Schichten kommen.

Sollten besser leitende Fest-Elektrolyt-Materialien entwickelt werden, dann könnte man sich den Aufbau funktionierender Batteriezellen vorstellen. Diese Materialien sind aber heute noch nicht verfügbar/entwickelt.

Mit Li-Feststoff würden sich große Veränderungen für den Produktionsprozess ergeben, da es sich um eine ganz andere Technologie als bei LIB handelt: Die Batterie wird in Schichten nacheinander aufgebaut und es wird mit unterschiedlichsten Verfahren (beispielsweise Sputtern) gearbeitet. Es wäre daher, wie auch bei Li-S, selbst nach Erreichen der Schichtenstabilität und Temperaturbeständigkeit in Produktionsprozessen, mit einer weiteren Umsetzungsdauer von 5 bis 8 Jahren zu rechnen, bis Li-Feststoff in Elektrofahrzeuge in Serie integriert werden könnten.

Auch Li-Feststoff werden daher nicht vor 2035 bis 2040 in einem Elektrofahrzeug erwartet.

GESAMTÜBERBLICK

Damit zeigt die Roadmap eine evolutionäre Weiterentwicklung der Batterietechnologie auf, welche zumindest mit Blick auf Elektrofahrzeug-Batterien in den kommenden 10 bis 20 Jahren keine disruptiven Entwicklungen und damit engl. „Game changer“ erwarten lässt. Jedoch sind damit auch wahrscheinliche Entwicklungspfade aufgezeigt, welche keine „Show-stopper“ erwarten lassen sollten.

BEV

Für BEV werden heute großformatige LIB auf Basis von NMC (111) Kathodenmaterialien und Graphit Anoden (teilweise z. B. NMC mit LMO als Blends oder umgekehrt) eingesetzt. LIB auf Basis von NCA Kathodenmaterialien werden z. B. als kleinformatige Zellen von Panasonic im Model S von Tesla Motors Inc. verbaut. LIB auf Basis von LFP/Graphit werden von einigen chinesischen Automobilherstellern eingesetzt und im chinesischen Markt verkauft.

Der HE-Pfad hin zu NMC/Graphit basierten LIB zeigt die Erwartungen insbesondere der Europäischen Automobilhersteller auf. In BEV integrierte und auf HE-NMC-Kathoden mit (Si/C)-Komposit-Anoden optimierte LIB werden zwischen 2020 und 2030 erwartet. Dies wird als Hauptpfad für die nächsten zwei Dekaden und damit den erwarteten Markthochlauf und die Diffusion von BEV gesehen. Dabei sollten andere Nickel-basierte Systeme (z. B. NCA) nicht völlig aus der Roadmap verschwinden und Entwicklungspotenziale weiter beobachtet werden.

4,4V- und HV-Systeme (bis 5V, dies jedoch bzgl. der Lebensdauer als einschränkender Schlüsselfaktor und insgesamt aus heutiger Sicht sehr anzuzweifeln) könnten jenseits 2025 bis langfristig eine technische Alternative bzw. Erweiterung bringen.

Li-S-Batterien könnten vermutlich erst ab 2030 eine Markteintrittschance in BEV haben, aber auch deren Tauglichkeit ist durch ihre volumetrische Energiedichte und die Leistungsdichte begrenzt, bei gleichzeitigen Herausforderungen eine entsprechende zyklische Lebensdauer und Kostenreduktion im Wettbewerb mit optimierten LIB zu gewährleisten. Der Fortschritt optimierter LIB könnte für die Li-S daher prinzipiell den Einstieg in die Elektromobilität verhindern.

Für Li-Feststoffbatterien stellen die genannten produktionstechnischen Herausforderungen ein besonderes Hemmnis dar.

Wenn Hochenergie LIB Systeme die aus heutiger Sicht verlässlichste bzw. aussichtsreichste Technologie für die kommenden rund 20 Jahre darstellen werden, stellt sich die Frage, zu welchen konkreten Entwicklungen diese in Bezug auf Kosten, Reichweite und sonstige Anforderungen an Fahrzeuge in der Zukunft beitragen können und ob es anderweitige Rahmenbedingungen und Faktoren gibt, welche ihrem Einsatz entgegen stehen könnten. Diese Fragen werden in der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ adressiert.

PHEV

Für PHEV gelten zunächst die gleichen Entwicklungen wie für BEV, wobei durch die höheren Anforderungen an die zyklische Lebensdauer mit einem späteren Einsatz von Li-Legierung/C-Komposit-Materialien als in BEV zu rechnen ist. Es gelten aber auch hier HE-LIB-Systeme als Basis für die Entwicklung von PHEV. Li-S-Systeme können aufgrund der begrenzten Leistungsdichte die Anforderungen der PHEV nicht erfüllen und werden dort nicht zum Einsatz kommen.

Sollten PHEV als Übergangstechnologie zu BEV hin und entsprechende Fahrzeugverkäufe langfristig (jenseits 2030) stagnieren oder gar rückläufig sein, so könnten ggf. weitere Technologien wie HV-LIB und Li-Feststoffbatterien gar nicht erst für PHEV relevant werden und sich die Nachfrage rein auf Hochenergie LIB (wie in BEV) beschränken.

HEV

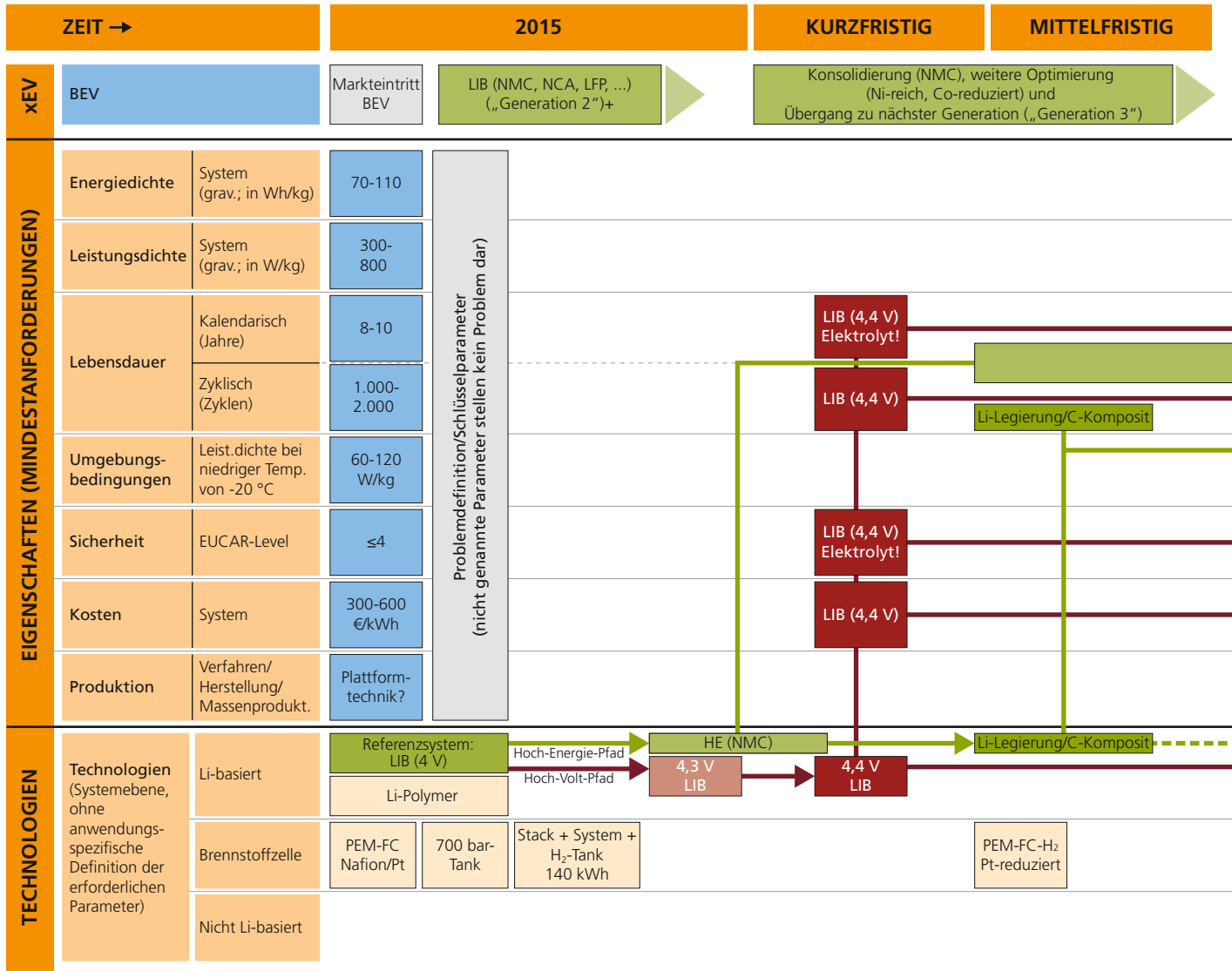
Für HEV entfällt aufgrund der hohen Anforderungen an die zyklische Lebensdauer der gesamte Hochenergiepfad der LIB. Langfristig bleiben nur HV-LIB und Li-Feststoffbatterien als Alternativen zu den heute bereits eingesetzten NiMH und LIB der 2. Generation (NMC, NCA und insbes. LFP basiert).

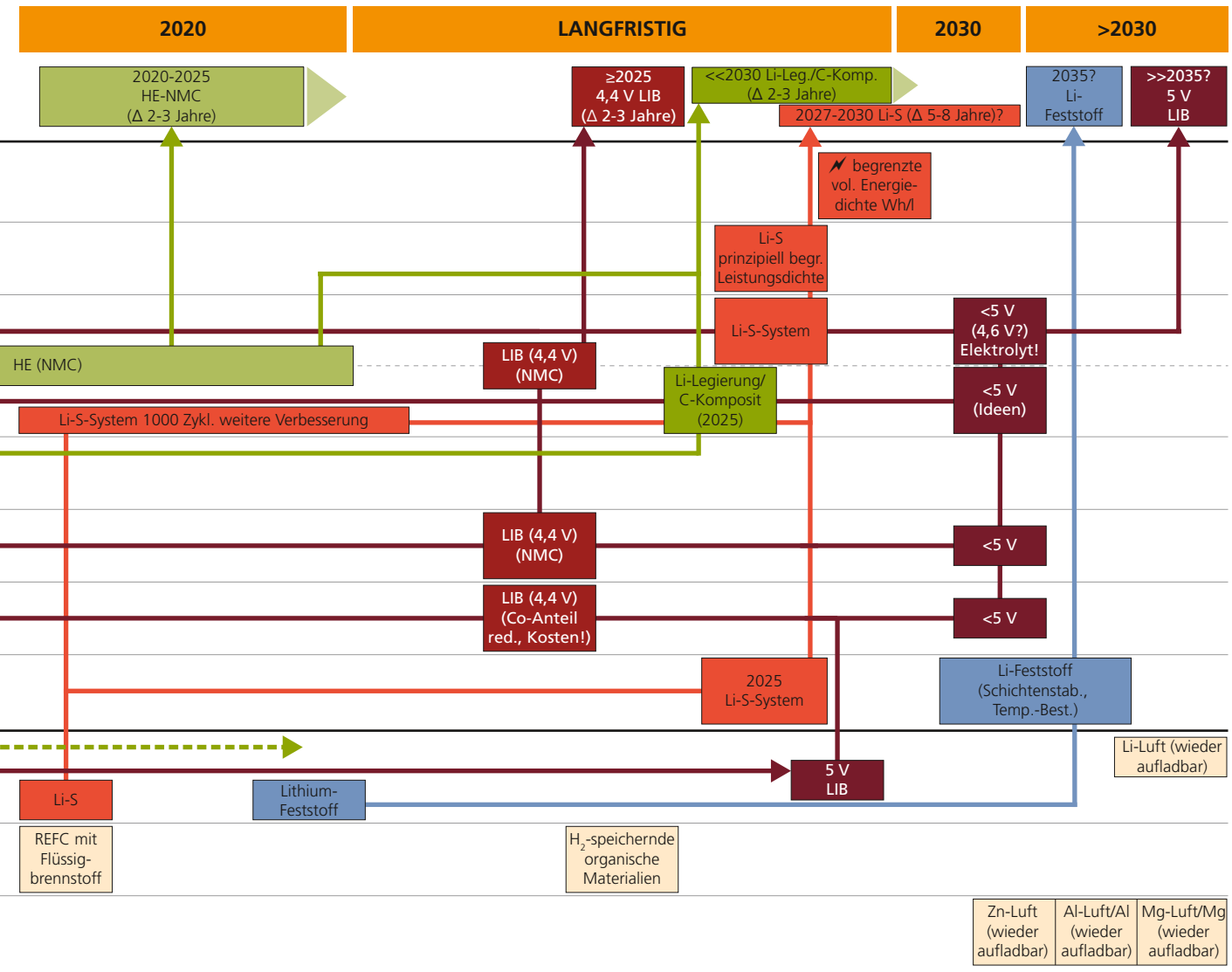
Da bereits heute eine Stagnation in den Verkaufszahlen der HEV zu beobachten ist und diese vermutlich in den kommenden 10 bis 20 Jahren den Entwicklungen und Verkäufen von PHEV und BEV weichen werden, dürften solche Post-LIB-Entwicklungen aber für HEV gar keine Rolle mehr spielen.

In den kommenden 10 Jahren ist mit einer zunehmenden Substitution der NiMH durch LIB zu rechnen. Die in HEV eingesetzte LIB Technologie wird sich dabei insgesamt wohl nicht mehr grundlegend ändern, außer dass die Batterien noch günstiger werden.

GESAMT-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030

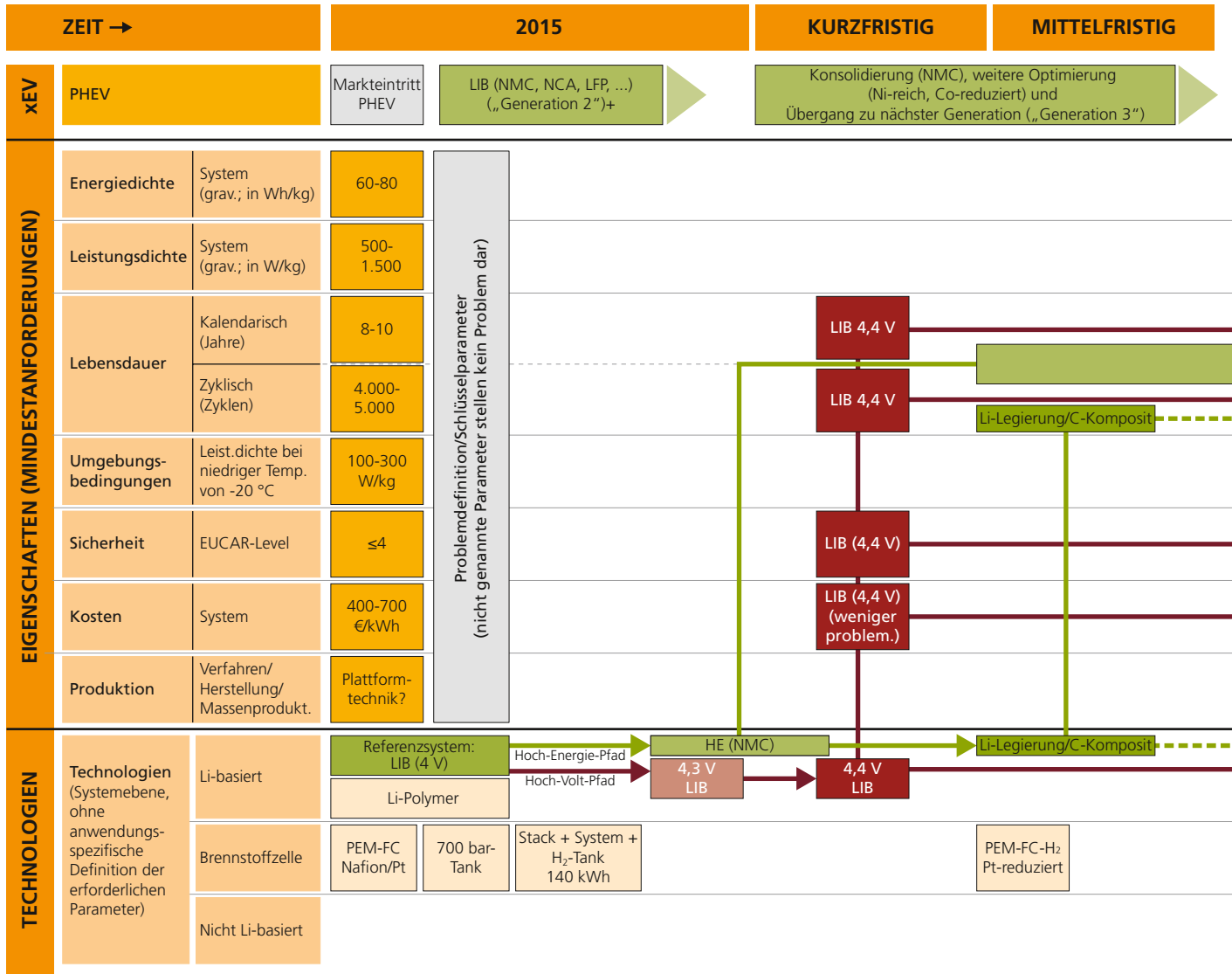
BATTERIEELEKTRISCH BETRIEBENE FAHRZEUGE (BEV)

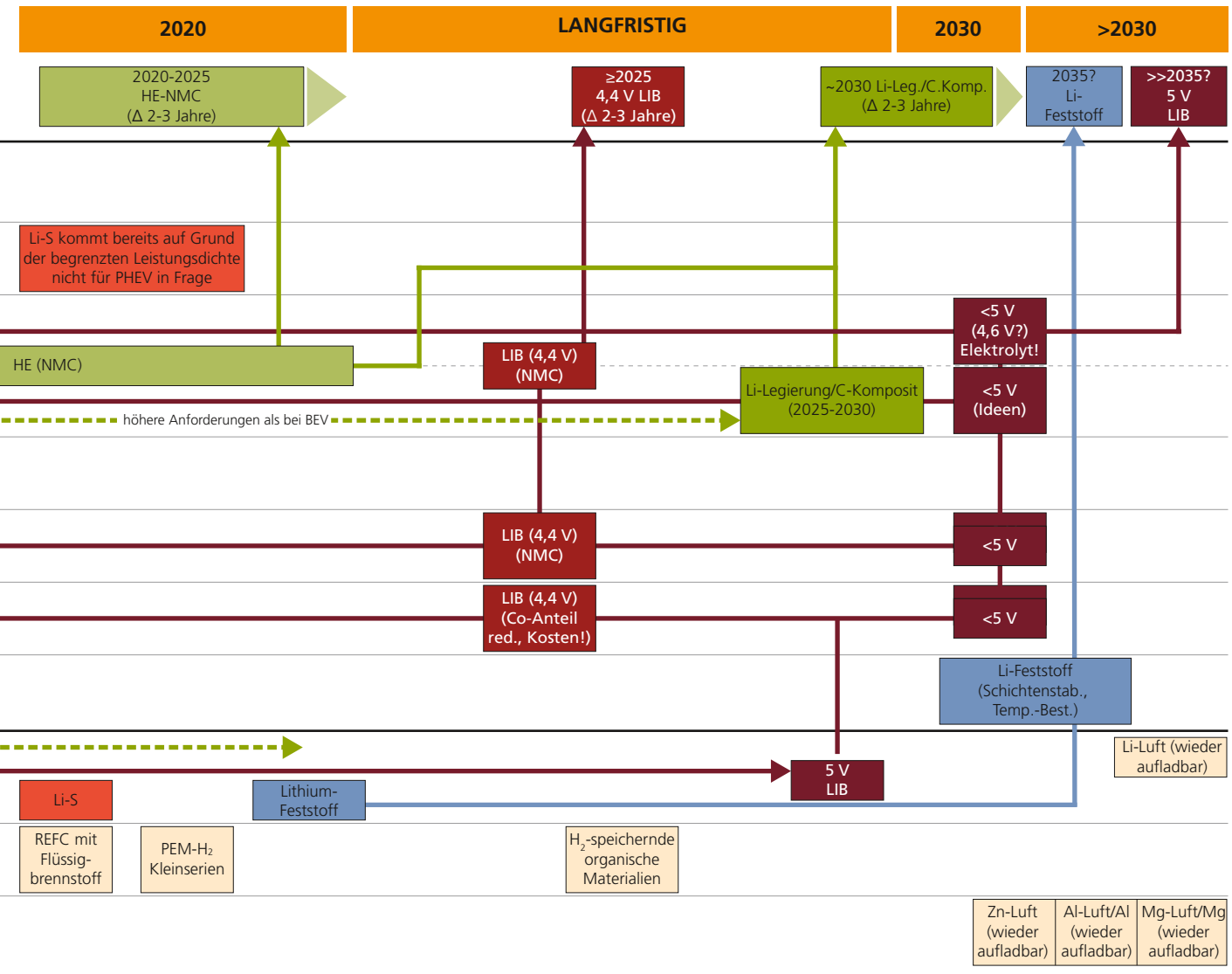




GESAMT-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030

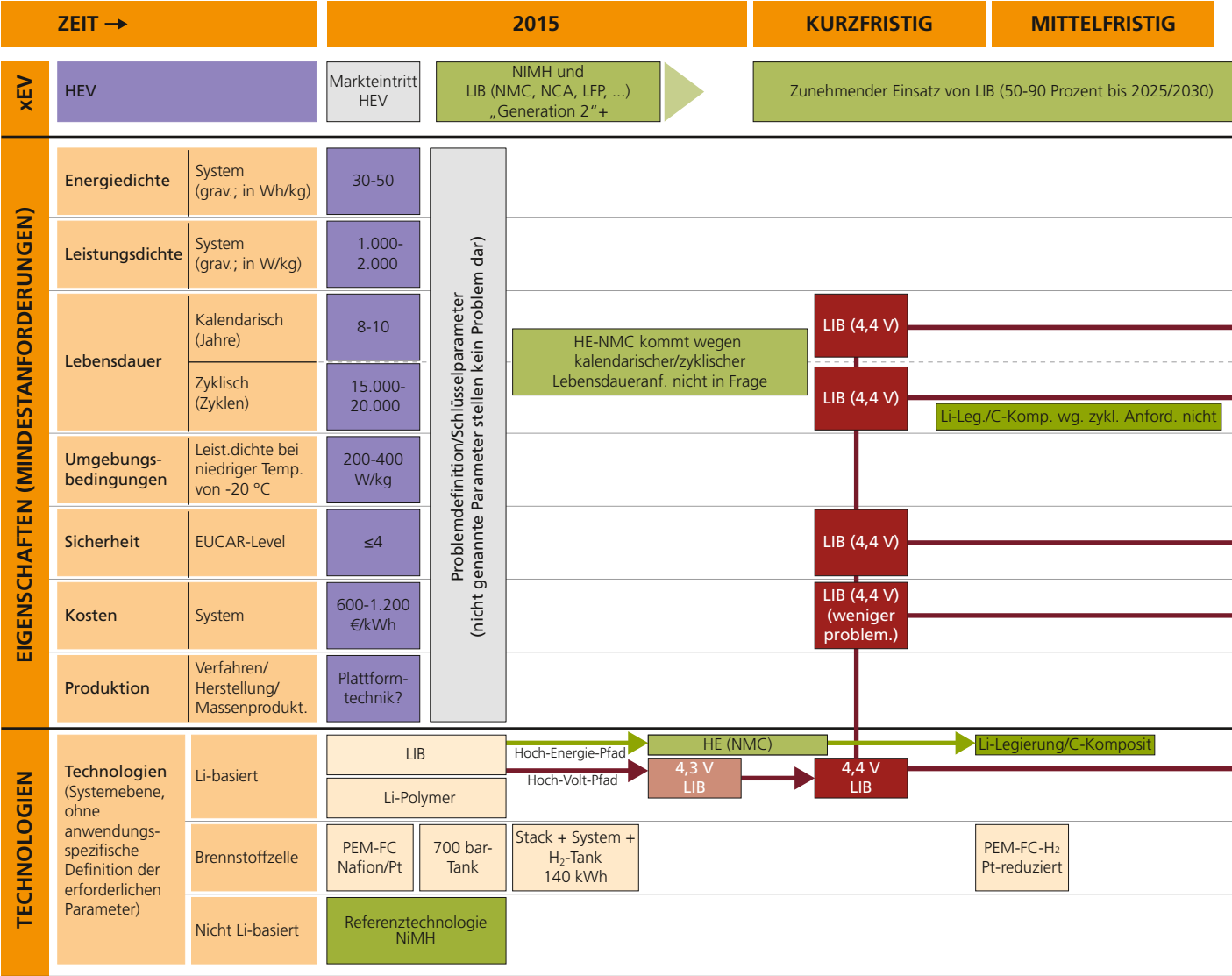
PLUG-IN-HYBRID-ELEKTRISCHE FAHRZEUGE (PHEV)

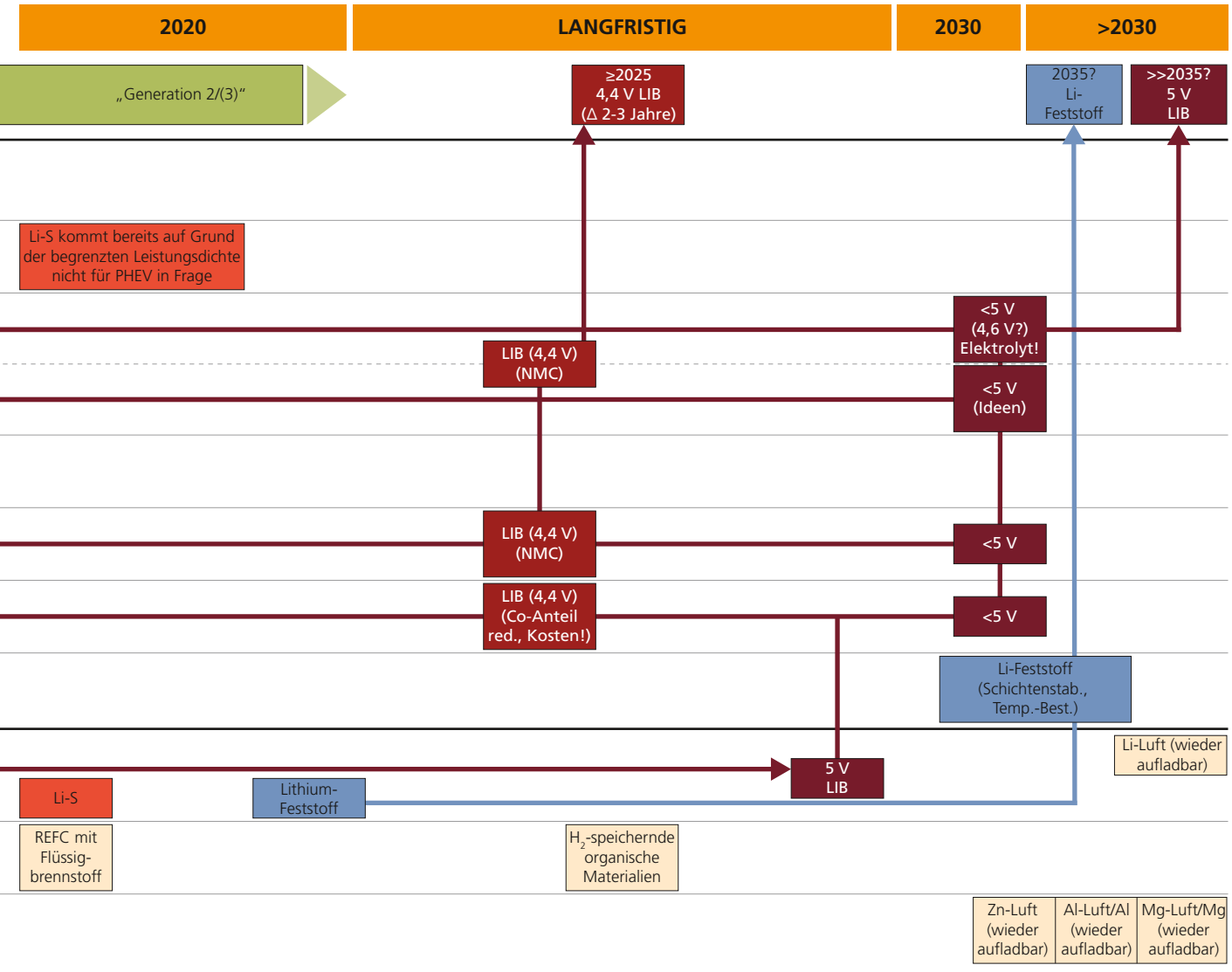




GESAMT-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030

HYBRIDELEKTROKRAFTFAHRZEUGE (HEV)





FAZIT UND AUSBLICK

FAZIT

Großformatige Lithium-Ionen-Batterien (LIB) haben für die kommenden 10 bis 20 Jahre noch ein hohes (evolutionäres) Entwicklungspotenzial bzgl. hoher Energiedichten und reduzierter Kosten, so dass sie als Plattformtechnologie für die globale Verbreitung in Elektrofahrzeugen (PKW) die aus heutiger Sicht aussichtsreichste Technologie als Ersatz für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor darstellen.

Die Roadmap zeigt auf, dass mit langfristiger Perspektive jenseits 2030 auch Batterietechnologien jenseits der LIB (Post-LIB) in elektromobilen Anwendungen zum Einsatz kommen können. Für diese sind jedoch noch hohe FuE-Anstrengungen nötig und sie sollten langfristig gefördert werden. Dabei zeigt die Roadmap anhand der Anforderungen der Elektrofahrzeuge an zukünftige Batterietechnologien, welche Schlüsselparameter und FuE-Themen für eine produktions- bzw. anwendungsnahe Entwicklung der Batterietechnologien im Fokus der FuE-Aktivitäten bzw. Förderung stehen sollten.

Für den Zeitraum, in welchem der Markthochlauf und die zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen erwartet werden, sind jedoch optimierte LIB als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität zu betrachten. Eine Technologie, welche geringfügige bzw. gut absehbare Veränderungen in der Produktionstechnologie mit sich bringt, andererseits aber noch viel Entwicklungspotenzial bzgl. Zell-Materialien, -Komponenten bis hin zum System und der Fahrzeugintegration und dem Fahrzeugdesign birgt. Ein Verständnis und Zugang zu Zellproduktionsanlagen und Know-how in den kommenden Jahren bzw. Jahrzehnten ist daher mit entscheidenden Wettbewerbsvorteilen für Forscher, Entwickler, Zulieferer (z. B. Material-/Komponentenhersteller, Maschinenbau etc.) und Zellhersteller in diesem Bereich verbunden.

Die vorliegende Gesamt-Roadmap geht nicht auf Fragen der Wertschöpfung und Relevanz einer Zellproduktion ein, zeigt jedoch anhand des Fokus auf einen klaren Entwicklungspfad deutlich deren Bedeutung gerade mit Blick auf die Elektromobilität (konkret BEV und PHEV).

In der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ wird auf die Marktentwicklung und Nachfrage nach LIB sowie die zu erwartende Wertschöpfung in Elektrofahrzeugen vertieft eingegangen. In der „Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen Batterien 2030“ wird auch auf Anwendungen jenseits der Elektromobilität eingegangen.

AKTUALISIERUNG DER ROADMAP

Die „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 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-esemroad.php.

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

BENACHBARTE PROJEKTE ZUR ELEKTROMOBILITÄT

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

AUSGEWÄHLTE PROJEKTE

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

GLOSSAR

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.

5 V-LIB

Mit der Verbesserung der Zellspannung von Lithium-Ionen-Batterien geht der Bedarf von Hochvolt-Elektroden sowie Elektrolytmaterialien für die 5 V-LIB mit bis zu 5 V Zellspannung einher.

Ah

Die Amperestunde ist eine physikalische Einheit zur Messung von elektrischer Ladung und gibt die Ladung einer Batterie an. Eine Ah ist die Ladungsmenge, die innerhalb einer Stunde (h) bei konstantem Strom von einem Ampere (A) durch einen Leiter fließt.

Al-Luft

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

BEV

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

BMBF

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

BMS

Engl. „Battery management system“, steuert die Batterieladung und -entladung.¹⁴ Ein intelligentes BMS ist notwendig, um die Batterielebensdauer zu verlängern, was die Betriebskosten auf die gesamte Lebensdauer gerechnet reduziert. Das System überwacht fortwährend die Einhaltung der Betriebsparameter aller in einem Batteriesystem verbauten Batteriezellen und steuert deren Ladezustand. Mit zunehmendem Alter lässt die

Speicherkapazität der einzelnen Batteriezellen unterschiedlich stark nach. Die Herausforderung ist nun, die Auslastung jeder einzelnen Zelle individuell zu optimieren: Schaltkreise zum Überwachen der Zelle und für das sogenannte engl. „Active balancing“ zwischen den Batteriezellen während des Lade- und Entladevorgangs ermöglichen es, die effektive Reichweite sowie die Lebensdauer der gesamten Batterie zu verlängern.

BMVBS

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

BZ

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

Core/Shell

Die Grundidee von Core shell-Materialien kommt aus der Nanotechnologie, wo sogenannte Core/Shell- oder Kern/Hülle-Nanopartikel aus einem Kern aus einem Material und einer Hülle aus einem anderen Material bestehen.¹⁵ Der Kern ist immer anorganisch (z. B. ein Oxid, ein Nitrid, ein Carbid), die Hülle besteht entweder aus einem anderem Oxid, Nitrid, Carbid (z. B. Oxid/Oxid, Nitrid/Nitrid, Carbid/Carbid) oder einem organischen Material (z. B. ein polymerisierbares Monomer, ein Tensid, ein oberflächenaktives organisches Molekül, ein organischer Farbstoff). Durch geschickte Auswahl von Kern- und Hüllenmaterial lassen sich Materialeigenschaften kombinieren oder die Oberfläche funktionalisieren.

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 1000mAh die Entladerate 1 C gewählt, so fließt eine Stunde lang ein Strom von 1000mA.

EU

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

EUCAR-Level

Engl. „European Council for Automotive R&D“ (EUCAR), ein großer Interessensverband der wichtigsten Automobil- und Nutzfahrzeughersteller in Europa. Gefördert und koordiniert werden vorwettbewerbliche Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit dem Ziel, die höchste Effizienz, Effektivität und Wirtschaftlichkeit in der FuE zu erreichen. Damit soll die automobilen Technologie auch weiterhin ein hohes Niveau an Lebensdauer, Qualität, Sicherheit und Zuverlässigkeit mit einem zunehmend geringeren Umwelteinfluss zu akzeptablen Kosten erreichen.

EUCAR legt Gefährdungsstufen für elektrische Energiespeichertechnologien fest, die auf der Widerstandsfähigkeit einer Technologie angesichts von Missbrauchsbedingungen basieren. Die komplette Skala, Beschreibung sowie Klassifikationskriterien und Effekte sind in der „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ im Anhang dargestellt. Hersteller und Zulieferer müssen ihre Batterien entsprechend entwickeln und testen, um das Erreichen der notwendigen EUCAR-Level sicherzustellen.

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.

GW

Abkürzung für Gigawatt.

GWh

Abkürzung für Gigawattstunde.

H₂

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

HE bzw. HE-LIB

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

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.

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 sehr gering ist, werden Kondensatoren nicht als ausschließlicher Energiespeicher für die Elektromobilität betrachtet.

l

Abkürzung für Liter.

LCO

Engl. „lithium cobalt oxide“, Lithium-Kobaltdioxid (Summenformel LiCoO_2) ist ein für Lithium-Ionen-Batterien der ersten Batteriegeneration etabliertes Kathodenmaterial. Es weist eine hohe Stabilität auf, eine relativ hohe Leistungsdichte und kann damit schnell ge- und entladen werden. Batterien mit diesem Kathodenmaterial weisen eine geringe Selbstentladung sowie eine hohe Zyklenfestigkeit auf. Als Nachteil ist vor allem die eher geringe Energiedichte zu nennen.

LIB

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

LIB 2015

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

Li-Feststoff

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

LFP

Engl. „lithium iron phosphate“, Lithium-Eisenphosphat (Summenformel LiFePO_4) 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_2 . Weil sie aber eine längere Lebenszeit und höhere Leistungsdichte sowie eine verbesserte Sicherheit aufweisen, bieten sie auch Vorteile für den Einsatz in Elektrofahrzeugen.

Li-Legierung/C-Komposit

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

Li-Luft

In dem Lithium-Luft-Akkumulator 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 Lithium-Luft-Batterien als wiederaufladbare Systeme für Elektrofahrzeuge 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.

LMO

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

LTO

Engl. „lithium titanium oxide“, Abkürzung von Lithium-Titanoxid oder Lithium-Titanat mit der Summenformel $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, das ein vielversprechendes Anodenmaterial für bestimmte Nischenanwendungen darstellt, welche eine hohe Zyklenfestigkeit und eine lange kalendarische Lebensdauer benötigen. LTO-basierte Batteriezellen haben eine geringere Zellspannung, was ihre Sicherheit erhöht. Die Batterien sind schnell aufladbar und können dank ihrer chemischen Stabilität in einer größeren Temperatur-Bandbreite betrieben werden. Ihre Energiedichte ist niedriger als bei anderen Lithium-Ionen-Batterien, ihre Leistungsdichte je nach Kathodenmaterial besser. Als weiterer Nachteil gelten die materialbedingt hohen Kosten.

mAh

Eine Milliampere-stunde entspricht einer tausendstel Ampere-stunde.

METI

Engl. „Ministry of Economy, Trade and Industry“, das Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie von Japan. Im November 2015 geleitet von Minister Motoo Hayashi.

Mg-Luft

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

MW

Abkürzung für Megawatt.

MWh

Abkürzung für Megawattstunde.

NaNiCl₂

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

NaS

Natrium-Schwefel-Akkumulatoren, in denen Elektroden aus 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.

NEDO

Engl. „New Energy and Industrial Technology Development Organization“, die größte öffentliche Organisation Japans zur Förderung von Forschung und Entwicklung an und Bereitstellung von neuen industriellen, energie- und umweltbezogenen Technologien. Der größte Teil ihres Budgets wird durch das METI zur Verfügung gestellt.

NiMH

Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren, in denen Elektroden aus Nickeloxidhydroxid und einer Wasserstoffspeicherlegierung aus Nickel und sogenanntem Mischmetall mit Seltenerdeelementen 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 gelten verschiedene Zusammensetzungen von Nickel, Kobalt und Mangan als besonders vielversprechend für den Einsatz in Lithium-Ionen-Batterien: 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.

Pb

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

PEM-FC

Engl. „proton exchange membrane fuel cell“.

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.

Plattformtechnologie

Eine Technologie wird dann als Plattformtechnologie bezeichnet, wenn sie ggf. mit einigen Modifikationen in zahlreichen Anwendungen und/oder Branchen eingesetzt werden kann.

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.

RBW

Engl. „red brick wall“, steht als „rote Pflasterstein-Mauer“ im übertragenen Sinn für eine maßgebliche Herausforderung in FuE, welche es im Zuge des technischen Fortschritts zu „durchbrechen“ bzw. zu meistern gilt.

REFC

Engl. „range-extended fuel cell (electric vehicle)“ ist ein Fahrzeug, in welchem das Antriebssystem auf einer Brennstoffzelle basiert und das über ein Aggregat zur Reichweitenverlängerung verfügt.

RFB

Steht für Redox-Flow-Batterie, ein Akkumulatorenkonzept, welches auf der Reduktion und Oxidation von umgepumpten Elektrolytlösungen aus Vorrattanks an einem brennstoffzellartigen Stack basiert.

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.

Si/C-Komposite

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

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).

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.

TCO

Engl. „Total cost of ownership“, Abkürzung TCO, eine Methode zur Abschätzung aller mit einer Investition verbundenen direkten (z.B. Anschaffungs-) und indirekten (z.B. Schulungs-) Kosten, auch im späteren Betrieb.

Technologie-Roadmap

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

Thermal runaway

Eine Schwäche von Lithium-Ionen-Batterien ist, dass sie über keine inhärente Sicherheit verfügen und thermisch „durchgehen“ bzw. einen „thermal runaway“ erleiden können. Unterschieden werden externe Auslöser wie elektrischer, thermischer und mechanischer Fehlgebrauch (engl. „abuse“) und interne Auslöser wie metallische Verunreinigungen, schadhafte Separatoren und Lithium-Abscheidungen auf der Anode, die allesamt zur Zersetzung der Zelle führen können.¹⁷ Das Ergebnis ist überwiegend ein Anstieg der Zelltemperatur, der zur thermischen Zersetzung weiterer Zellkomponenten und zu zusätzlicher Wärmeentwicklung führen kann. Bestimmte Kathodenmaterialien (zum Beispiel LCO und NCA), die bei erhöhten Temperaturen in einer exothermen Reaktion Sauerstoff freisetzen, verursachen einen weiteren Temperaturanstieg. Die Folge dieses sich selbst beschleunigenden Vorgangs ist also häufig eine unkontrollierte Zellerhitzung bis hin zum Zellbrand. Die chemische Sicherheit der Lithium-Ionen-Batterien basiert deshalb in erster Linie auf der thermischen Stabilität der Zellkomponenten und dem Gefährdungspotenzial der Zersetzungsprodukte.

Thermomanagement

Die Rolle des Thermomanagements in Elektrofahrzeugen kann aufgrund der begrenzten Batteriekapazität bzw. Fahrzeugreichweite gar nicht deutlich genug hervorgehoben werden: Die temperaturempfindliche Lithium-Ionen-Batterie muss für den ordnungsgemäßen Betrieb auf gewisse Betriebstemperaturen gekühlt werden, was eine Anbindung der Batteriekühlung an die Klimatisierung des Fahrzeugs notwendig macht.¹⁸ Zum anderen stellen die Klimatisierung im Sommer und vor allem die Innenraumheizung im Winter neue Ansprüche an die Auslegung dieser Systeme. Mit steigender Elektrifizierung des Antriebsstrangs muss die hierfür erforderliche Leistung mehr und mehr von der Batterie zur Verfügung gestellt werden, mit entsprechender Reduktion der elektrischen Fahrzeugreichweite. Die Thermomanagementsysteme müssen also möglichst effizient arbeiten. Die Klimatisierung ist jedoch nicht nur unter dem Komfortaspekt und damit der Kundenakzeptanz zu sehen; es spielen hierbei auch Sicherheitsthemen eine wichtige Rolle. Im Winter müssen die Scheiben möglichst schnell und dauerhaft eis- und beschlagfrei gehalten werden, im Sommer wird durch einen angenehmen klimatisierten Fahrzeuginnenraum der sogenannte thermische Stress für den Fahrer verringert und seine Konzentrationsfähigkeit erhöht.

V

Abkürzung für Volt.

Volumetrische Energie-/Leistungsdichte

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

VRFB

Die Vanadium-basierte Redox-Flow-Batterietechnologie ist eine Variante der Redox-Flow-Batterie. 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 NaNiCl_2

Zn-Luft

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

Zyklusfestigkeit

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

QUELLEN

¹ Schade et al./edition sigma, Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG (2014): Sieben Herausforderungen für die deutsche Automobilindustrie – Strategische Antworten im Spannungsfeld von Globalisierung, Produkt- und Dienstleistungsinnovation bis 2030 (Studien des Büros für Technikfolgen-Abschätzung (TAB) beim Deutschen Bundestag – Bd. 40). Online-Ressource, Link: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/buecher/schade-et-al-2014-152.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

² So werden zum Beispiel bis zu 145 US\$/kWh LIB-Zellen von LG Chem Ltd. genannt, siehe InsideEVs (2015): LG Chem "Ticked Off" With GM For Disclosing \$145/kWh Battery Cell Pricing – Video. Online-Ressource, Link: <http://insideevs.com/lg-chem-ticked-gm-disclosing-145kwh-battery-cell-pricing-video/>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

3

• Anderson (2009): An Evaluation of Current and Future Costs for Lithium-Ion Batteries for Use in Electrified Vehicle Powertrains (Masterprojekt der Duke University). Online-Ressource, Link: http://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/1007/Li-Ion_Battery_costs_-_MP_Final.pdf;jsessionid=E0AAFCC66D4B7DAC025E5DB66A681DAE?sequence=1, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

• New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO, 2008 / 2010 / 2013): Die größte öffentliche Organisation Japans zur Förderung von FuE an und Bereitstellung von neuen industriellen, energie- und umweltbezogenen Technologien. Der größte Teil ihres Budgets wird durch das japanische Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) zur Verfügung gestellt. Die NEDO veröffentlichte und aktualisierte in den Jahren 2008, 2010 und 2013 ihre sogenannte „Battery Roadmap“, die wie folgt im Internet abgerufen werden können:

NEDO (2008): Battery Roadmap 2008. Online-Ressource, Link: <http://www.nedo.go.jp/content/100153964.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

NEDO (2010): Battery Roadmap 2010. Online-Ressource, Link: <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100519a05j.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

NEDO (2013): Battery Roadmap 2013. Online-Ressource, Link: <http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

• Piot (2008): Using the learning curve concept to predict technological progress – A particular focus on the Lithium-Ion battery technology (Dissertation der Cambridge University)

• Tarascon (2009): Batteries for Transportation Now and in the Future (Präsentation auf Energy 2050 am 19.-20. Oktober 2009 in Stockholm, Schweden)

• Tesla Motors Inc. (2008): Tesla Motors Overview. Online-Ressource, Link: http://www.che.ncsu.edu/ILEET/phevs/plug-in_2008/6A-2_Tesla%20Motors%20Overview.pdf, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

• U.S. Department of Energy/Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (DOE, 2010): Vehicle Technologies Program – Multi-Year Program Plan 2011 – 2015 (December 2010). Online-Ressource, Link: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/program/vt_mypp_2011-2015.pdf, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

• Zu et al. (2011): Thermodynamic analysis on energy densities of batteries. Paper erschienen im Journal of Energy & Environmental Science, Jahrgang 2011, Ausgabe 4, Seiten 2614–2624. Online-Ressource, Link: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/ee/c0ee00777c#!divAbstract>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

⁴ NEDO (2013): Battery Roadmap 2013. Online-Ressource, Link: <http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

⁵

- AOL Inc./autoblog (2014): Panasonic has an idea to be Tesla's one and only gigafactory partner. Online-Ressource, Link: <http://green.autoblog.com/2014/05/27/panasonic-has-an-idea-to-be-teslas-one-and-only-gigafactory-par/>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Guy Weemaes/GoingElectric (2013): Tesla: Batteriekosten fallen unter 180 €/kWh. Online-Ressource, Link: <http://www.goingelectric.de/2013/08/10/news/tesla-model-s-batterie-kosten-180-euro-kilowattstunde/>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Seeking Alpha, Ltd. (2014): Tesla's Gigafactory And Why Competitors Should Worry. Online-Ressource, Link: <http://seekingalpha.com/article/2295695-teslas-gigafactory-and-why-competitors-should-worry>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Tesla Motors Inc. (2014): Gigafactory. Online-Ressource, Link: http://www.teslamotors.com/de_AT/blog/gigafactory, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- The Economist Newspaper Ltd. (2014): Elon Musk's gigafactory – Assault on batteries. Online-Ressource, Link: <http://www.economist.com/news/business/21604174-better-power-packs-will-open-road-electric-vehicles-assault-batteries>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

⁶

- Cadex Electronics Inc. / Battery University / Freedonia Group (2011): Battery Statistics – Figure 8: Li-Ion pricing and energy density. Online-Ressource, Link: http://www.batteryuniversity.com/learn/article/battery_statistics, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Mitsubishi Motors Corp. (2011): Kenndaten des Mitsubishi innovative Electric Vehicle (i-MiEV)
- NEDO (2010): Battery Roadmap 2010. Online-Ressource, Link: <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100519a05j.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Panasonic Corp. (2006): Präsentation auf dem Florida Educational Seminar am 14. März 2006
- Piot (2008): Using the learning curve concept to predict technological progress – A particular focus on the Lithium-Ion battery technology (Dissertation der Cambridge University)
- Tarascon (2009): Batteries for Transportation Now and in the Future (Präsentation auf Energy 2050 am 19.-20. Oktober 2009 in Stockholm, Schweden)
- Thielmann et al./Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI, 2012): Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Online-Ressource, Link: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/de/publikationen/TRM-ESEM-2030.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

⁷

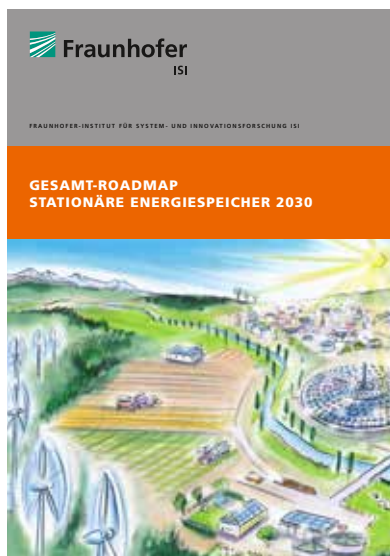
- Forbes.com LLC™ (2015): LG Chem May Be On The Verge Of Dominating EV Battery Industry. Online-Ressource, Link: <http://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2015/10/28/lg-chem-may-be-on-the-verge-of-dominating-ev-battery-industry/>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Green Car Congress (2015): STEAG investing €100M in a total of 90 MW of grid energy storage systems with LG Chem Li-ion batteries. Online-Ressource, Link: <http://www.greencarcongress.com/2015/11/20151110-steag.html>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- PriusChat.com (2015): GM paying \$145 per kilowatt hour. Online-Ressource, Link: <http://priuschat.com/threads/gm-paying-145-per-kilowatt-hour.158958/>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- SustainableEnterprisesMedia, Inc. (2015): Chevy Bolt Battery Cells = \$145/kWh, New Chevy Volt With Autonomous Driving. Online-Ressource, Link: <http://cleantechnica.com/2015/10/05/chevy-bolt-battery-cells-145kwh-new-chevy-volt-with-autonomous-driving/>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- VerticalScope Inc./hybridCARS (2015): Chevy Bolt Represents Close Partnership Between GM and LG. Online-Ressource, Link: <http://www.hybridcars.com/chevy-bolt-represents-close-partnership-between-gm-and-lg/>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

⁸

- Anderman/Advanced Automotive Batteries (AAB, 2010): Feedback on ARB's Zero-Emission Vehicle Staff Technical Report of 11/25/2009 including attachment A: Status of EV Technology Commercialization. Online-Ressource, Link: http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/2009zevreview/anderman_review.pdf, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Anderson (2009): An Evaluation of Current and Future Costs for Lithium-Ion Batteries for Use in Electrified Vehicle Powertrains (Masterprojekt der Duke University). Online-Ressource, Link: http://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/1007/Li-Ion_Battery_costs_-_MP_Final.pdf;jsessionid=E0AAFCC66D4B7DAC025E5DB66A681DAE?sequence=1, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Cadex Electronics Inc./Battery University/Freedonia Group (2011): Battery Statistics – Figure 8: Li-Ion pricing and energy density. Online-Ressource, Link: http://www.batteryuniversity.com/learn/article/battery_statistics, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Frost & Sullivan (2009): World Hybrid Electric and Electric Vehicle Lithium-ion Battery Market. Online-Ressource (Studie zum Kauf), Link: <http://www.frost.com/sublib/display-report.do?id=N6BF-01-00-00-00>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Lache et al./Deutsche Bank AG (2009): Electric Cars – Plugged In 2 – A mega-theme gains momentum. Deutsche Bank AG, Frankfurt am Main

- New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO, 2008 / 2010 / 2013): Die größte öffentliche Organisation Japans zur Förderung von FuE an und Bereitstellung von neuen industriellen, energie- und umweltbezogenen Technologien. Der größte Teil ihres Budgets wird durch das japanische Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) zur Verfügung gestellt. Die NEDO veröffentlichte und aktualisierte in den Jahren 2008, 2010 und 2013 ihre sogenannte „Battery Roadmap“, die wie folgt im Internet abgerufen werden können:
NEDO (2008): Battery Roadmap 2008. Online-Ressource, Link: <http://www.nedo.go.jp/content/100153964.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
NEDO (2010): Battery Roadmap 2010. Online-Ressource, Link: <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100519a05j.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
NEDO (2013): Battery Roadmap 2013. Online-Ressource, Link: <http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
 - Piot (2008): Using the learning curve concept to predict technological progress – A particular focus on the Lithium-Ion battery technology (Dissertation der Cambridge University)
 - Ralston et al. (2011): Plug-in Electric Vehicles – Literature Review. Online-Ressource, Link: <http://www.c2es.org/docUploads/PEV-Literature-Review.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
 - Sankey et al./Deutsche Bank AG (2010): The End of the Oil Age – 2011 and beyond: a reality check. Deutsche Bank AG, Frankfurt am Main
- ⁹ manager magazin new media GmbH/manager magazin online 2014: Elon Musks Gigafactory – Tesla baut seine Autos künftig ohne die legendären Laptop-Batterien. Online-Ressource, Link: <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/tesla-stellt-in-gigafactory-nicht-batteriezellen-vom-typ-18650-her-a-998973.html>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- ¹⁰ Anderman/Advanced Automotive Batteries (AAB, 2014): The Tesla Battery Report Tesla Motors: Battery Technology, Analysis of the Gigafactory, and the Automakers’ Perspectives. Online-Ressource, Link: <http://www.totalbatteryconsulting.com/industry-reports/Tesla-report/Extract-from-the-Tesla-battery-report.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- ¹¹ ADAC e.V./Das elektrische Fahrtenbuch – Der ADAC Blog zur Elektromobilität und alternativen Antrieben (2013): Batterie-Experte Sven Bauer: „Der Tesla-Akku oder der im BMW i3 – das ist ein gewaltiger Unterschied“. Online-Ressource, Link: <http://adacemobility.wordpress.com/2013/10/21/batterie-experte-sven-bauer-der-tesla-akku-oder-der-im-bmw-i3-das-ist-ein-gewaltiger-unterschied/>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- ¹² NEDO (2013): Battery Roadmap 2013. Online-Ressource, Link: <http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- ¹³ Recargo, Inc./plugincars (2013): Two Autolib Electric Cars Burn Down in Paris. Online-Ressource, Link: <http://www.plugincars.com/two-evs-parisian-autolib-car-sharing-service-burned-down-128577.html>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- ¹⁴ Infineon Technologies AG (2015): Batteriemangement. Online-Ressource, Link: <http://www.infineon.com/cms/de/applications/emobility/product-solutions-hev-ev/battery-management/>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- ¹⁵ 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
- ¹⁶ Karlsruher Institut für Technologie/Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT, 2015): Core/Shell-Nanopartikel. Online-Ressource, Link: <https://www.iam.kit.edu/wpt/286.php>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- ¹⁷ Korthauer et al. (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Science+Business Media S.A./Springer-Verlag Berlin Heidelberg – Seite 285f.
- ¹⁸ Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (2013): Motorentechnik – Teil 14: Thermomanagement im elektrifizierten Antrieb. Online-Ressource, Link: <http://www.springerprofessional.de/mtz-wissen-teil-14/4569448.html>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

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.

