

TECHNOLOGIE-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030



VORWORT



Im Rahmen ihres dritten Fortschrittsberichts vom Juni 2012 stellt die Nationale Plattform Elektromobilität fest, dass Deutschland als Forschungsstandort für die Elektromobilität international gut aufgestellt ist. Zur Erreichung des Ziels der Leitanbieterschaft für die Elektromobilität initiiert sie sechs Forschungs- und Entwicklungsleuchttürme, wozu mit dem „Leuchtturm Batterie“ auch ein speziell auf diese Schlüsseltechnologie ausgerichteter Schwerpunkt vorgesehen ist. Das Ziel für das Jahr 2020 ist, Deutschland als Technologieführer bei Zellen und Batterien zu etablieren und eine integrierte Produktion am Standort Deutschland aufzubauen.¹

Dies dokumentiert die Rolle, die der Forschung und Entwicklung von großformatigen Batterien für die Elektromobilität beigemessen wird. Hinzu kommen Maßnahmen, die über spezifische Förderprogramme der Bundesregierung z.B. zur Entwicklung und Demonstration von Brennstoffzellenfahrzeugen abgedeckt und beispielsweise über das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie als Initiative des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, vorangetrieben werden.² Unter anderem auf der 64. IAA PKW 2011 und der kürzlich stattgefundenen 64. IAA Nutzfahrzeuge 2012 zeigte der Verband der Automobilindustrie wieder einmal, welche immense Bedeutung der deutschen Automobilindustrie im „Land des Automobils“ beizumessen ist. Im Jahr 2011 arbeiteten im Jahresdurchschnitt 719 535 Beschäftigte in über 600 Hersteller- und Zulieferunternehmen, die rund 13 Milliarden Euro an Bruttoanlageinvestitionen vornahmen und intern rund

16 Milliarden Euro für Forschung und Entwicklung ausgaben.^{3,4} Ein zunehmend ansteigender Prozentsatz davon dürfte für Projekte im Bereich Elektromobilität verwendet werden und dabei insbesondere im Themenbereich der für die Durchsetzung der Elektromobilität äußerst wichtigen Energiespeicher. Die in dieser vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Broschüre vorliegende Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030 spiegelt die Bedeutung der deutschen Automobilindustrie ebenfalls wider. Die Roadmap wurde von einem Expertenteam unter Koordination des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI erstellt. Sie konzentriert sich hinsichtlich der Energiespeicher für die Elektromobilität auf Batterietechnologien für Plug-in-Hybride und rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge. Diese gelten heute als zur Einsparung von CO₂-Emissionen vielversprechendste Anwendungen.

Da neben den Batterien für die Elektromobilität in diesem Zusammenhang auch die Brennstoffzellentechnologie von deutschen Automobilherstellern als zukunftsfähiges Antriebskonzept angesehen wird und intensiv daran geforscht und entwickelt wird, findet auch diese Technologie ihre Berücksichtigung im Rahmen dieser Roadmap. Hinsichtlich der Batterietechnologie wird zwischen Lithium-basierten und nicht Lithium-basierten Technologien wie z.B. Zink-, Aluminium- oder Magnesium-Luft-Systemen unterschieden. Weil den Lithium-basierten Energiespeichern aber das größte Potenzial zugemessen wird, werden in der Roadmap auch ganz spezifische Herausforderungen für die Forschung und Entwicklung an diesen Energiespeichern dokumentiert, die es auf dem Weg zur als Ziel postulierten Leitanbieterschaft noch zu lösen gilt.

Dr. Kai-Christian Möller
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Projektgruppe Elektrochemische Speicher, Garching b. München
Stellvertretender Sprecher der Fraunhofer-Allianz Batterien

EINLEITUNG

ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT

Die Elektromobilität symbolisiert einen vielversprechenden Trend für die Zukunft der Mobilität und ist in der öffentlichen Diskussion in Deutschland ein fester Bestandteil geworden. Für ihre Verwirklichung spielt es eine große Rolle, welche Energiespeichertechnologien in Forschung und Entwicklung befindlich sind und ab wann sie der Industrie in Marktreife zur Verfügung stehen.

Die im Mai 2010 von der Bundesregierung initiierte „Nationale Plattform Elektromobilität“ (NPE) identifizierte in ihrem zweiten Zwischenbericht vom Mai 2011 die Batterietechnologie als einen „Leuchtturm“ in Forschung und Entwicklung, und sie empfahl nachdrücklich ihre Förderung.⁵ Im dritten Fortschrittsbericht vom Juni 2012 schildert die NPE, auf welche Themencluster und Projekte sich das für den Leuchtturm Batterie veranschlagte Projektvolumen von 601 Millionen Euro über drei Jahre verteilt. Die Förderschwerpunkte liegen nun auf Forschungsthemen, die zur Marktvorbereitung, und dabei insbesondere für den Aufbau von Pilotanlagen für die Zell- und Batterieproduktion, entscheidend sind. Die technologische Entwicklung erscheint zum jetzigen Zeitpunkt offen, weshalb die NPE eine duale Strategie verfolgt. Sie umfasst sowohl Lithium-Ionen- als auch Post-Lithium-Ionen-Technologien.

Zu den relevanten Märkten für die Elektromobilität der Zukunft zählen aus Sicht der NPE:

- Rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)
- Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV)
- Elektrofahrzeuge mit Range-Extender-Lösungen (REEV)
- PHEV-Nutzfahrzeuge

Die auf Lithium basierende Batterietechnologie gilt dabei als Türöffner. Sie bietet die derzeit beste verfügbare Batterieoption zur Erzielung akzeptabler Reichweiten für die oben genannten Anwendungen. Allerdings könnte auch die Brennstoffzellentechnologie in den kommenden Jahren Marktreife erlangen. Deshalb ist auch diese Technologie mit ihren spezifischen Herausforderungen und Potenzialen im Auge zu behalten.

TECHNOLOGIE-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030

Bei der 2010 veröffentlichten „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ lag der Fokus auf der Entwicklung der Zellkomponenten, Zelltypen und Zelleigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien und ihren Verknüpfungen einschließlich des sie umgebenden Technologieumfeldes von 2010 bis ins Jahr 2030.⁶ Die vorliegende „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ geht inhaltlich über die Lithium-basierte Technologie hinaus. Sie führt die auf Zellebene identifizierten Entwicklungstrends elektrochemischer Hochenergiespeicher auf Systemebene fort und bezieht auch die Brennstoffzellentechnologie als eine ernst zu nehmende Alternative mit ein. Gegenüber der in der Roadmap verorteten Marktreife der Batteriesysteme wird jedoch für deren Einführung in Elektrofahrzeugen seitens der Industrie üblicherweise je nach Anwendung ein weiterer Zeitsprung von fünf bis zehn Jahren genannt. Aktuelle Batterieentwicklungen sind somit erst in einigen Jahren in kommerziell verfügbaren Elektrofahrzeugen zu erwarten.

Die vorliegende Roadmap ist auf die Technologieentwicklung für elektromobile Anwendungen ausgerichtet. Mit dem Schwerpunkt auf BEV und PHEV stehen die zwei Mobilitätskonzepte im Vordergrund, die besondere Anforderungen an Batterien mit hoher Energiedichte stellen und sowohl kurz- bis mittelfristig (PHEV) als auch mittel- bis langfristig (BEV) als die zentralen Konzepte für die Einführung und Marktverbreitung in der Elektromobilität gelten. Die spezifischen Anforderungen an Energiespeicher für Elektrofahrzeuge unterscheiden sich z. T. erheblich von denen an die Speicher für stationäre Anwendungen, für die Konsumelektronik und andere Nischenanwendungen, wie bereits in der Anfang 2012 veröffentlichten „Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ diskutiert.⁷ Für stationäre Energiespeicher wird deshalb gesondert eine spezifische „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ entworfen und bis Ende 2012 veröffentlicht.

METHODIK UND VORGEHENSMODELL

Der Erstellung der „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ liegt ein methodisch gestütztes Vorgehensmodell zugrunde. Dafür wurden qualitative und quantitative Forschungsmethoden kombiniert. Das Vorgehensmodell besteht aus vier Schritten:

- Technologie- und Marktanalysen inklusive aktueller Publikationen, Marktstudien, Strategiedokumente verschiedener Regierungen etc.
- Experten- und Unternehmensbefragungen zur Überprüfung quantitativer Einschätzungen sowie zur Einholung von Feedback und zur Validierung der Ergebnisse des im Nachfolgenden genannten Workshops
- Durchführung eines Expertenworkshops zur Roadmap-Erstellung
- Methodisch differenzierte Ausarbeitung der Roadmap

Mit Hilfe der vorangestellten Technologie- und Marktanalysen wurden die Grundlagen zur Erstellung der Roadmap geschaffen, relevante Energiespeicherkonzepte im Vorfeld gesichtet und zur Diskussion im zentralen Expertenworkshop aufbereitet.

Experten- und Unternehmensbefragungen flossen begleitend in die Roadmap-Erstellung ein. Ausgewählte Expertenstatements dienen einer zusätzlichen Validierung und Bestätigung der Ergebnisse. Die Technologie-Roadmap selbst wurde 2011 im Rahmen eines durch das Fraunhofer ISI organisierten Expertenworkshops in Frankfurt am Main erstellt. Am Workshop nahmen 17 einschlägige Experten teil, mit Vertretern aus der anwendungsnahe Batterieforschung und aus der Industrie. Nach Prüfung der Workshop-Ergebnisse durch die Teilnehmer und der Einarbeitung ihres Feedbacks wurden die Abschätzungen und Zielwerte in der Roadmap für eine weitere unabhängige Validierung und einen internationalen Vergleich in die strategischen Zielwerte weltweit führender Nationen in der Batterieforschung und -entwicklung einsortiert.

In der vorliegenden Technologie-Roadmap sind die zentralen Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität für den Planungszeitraum vom Jahr 2011/2012 bis 2030 erstmals mit ihren quantitativen Leistungsparametern verortet, vergleichend bewertet sowie hinsichtlich technologischer Herausforderungen für die Zukunft dargestellt.



WELTWEITES ENERGIESPEICHER-MONITORING UND -BENCHMARKING

INTERNATIONALE ZIELWERTE FÜR DIE FuE VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Eine Betrachtung des Status quo der Batterieforschung, -entwicklung und -produktion für den Einsatz in Anwendungen der Elektromobilität zeigt, dass weltweit nur wenige Länder über die Ausgangsbasis sowie die Potenziale verfügen, einen Leitmarkt für die Elektromobilität unter Berücksichtigung der Batterieproduktion aufzubauen. Hierzu zählen – gemessen an Publikations-, Patent- und Marktanteilen hinsichtlich der Zellproduktion von Lithium-Ionen-Batterien im Allgemeinen und für großformatige Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität im Speziellen – Japan, Südkorea und China sowie die USA und innerhalb Europas insbesondere Deutschland und Frankreich.

In den letzten Jahren haben zahlreiche Regierungen weltweit ihre nationalen Zielwerte für die Markteinführung und -diffusion von Elektrofahrzeugen angekündigt. Sollten diese Ziele erreicht werden, so würden in 2015 rund 1,5 Millionen und 2020 etwa 7 Millionen Elektrofahrzeuge – bezogen auf Plug-in Hybride (PHEV) und rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge (BEV) – weltweit neu zugelassen werden. Diese Ziele korrespondieren gut mit den für die kommenden Jahre errechneten Prognosen.^{8,9} Um diese Ziele zu erreichen, haben die Regierungen in den vergangenen Jahren damit begonnen, staatliche FuE-Förderprogramme, Maßnahmen der Industrieförderung und des Infrastrukturausbaus in die Wege zu leiten sowie Rahmenbedingungen für die Verbreitung der Elektromobilität vorzubereiten. Die Förder- bzw. Investitionssummen für die Elektromobilität scheinen für die weltweit führenden Länder und Regionen ähnlich groß zu sein. Unterschiede bestehen darin, welche Schwerpunkte in der Zielsetzung gelegt werden und wie diese Ziele erreicht werden sollen. Gerade für die beiden Kriterien der Energiedichte und Kosten* zeigen Roadmaps und Strategiedokumente dieser Länder konkrete Zielvorstellungen, welche einen ersten Vergleich wesentlicher Strategien und Schwerpunkte erlauben.

* Alle ausländischen Währungen wurden in Euro umgerechnet und zwecks besserer Lesbarkeit auf glatte Beträge gerundet. Stichtag: 11. Oktober 2012

Japans traditionell gewachsene Bedeutung in der Batterie-industrie resultiert auch darin, dass die Zielwerte der NEDO hinsichtlich der Entwicklung von Energiedichte und Kosten weltweit am meisten beachtet werden. Sie gab für 2015 150 Wh/kg sowie 300 €/kWh und für 2020 250 Wh/kg sowie 200 €/kWh als ambitioniertes Ziel für großformatige Lithium-Ionen-Batteriezellen (für PHEV und BEV) aus.¹⁰ Südkorea als schnell innovierender und aufsteigender Wettbewerber hat über das MKE ebenfalls Zielwerte für die Entwicklung von Batteriezellen kommuniziert. Energiedichte und Kosten sollen sich demnach vom Jahr 2013 mit 100 Wh/kg und 350 €/kWh bis zum Jahr 2017 auf 180 Wh/kg und 210 €/kWh sowie bis zum Jahr 2020 auf 250 Wh/kg und 150 €/kWh verbessern.¹¹ Hinsichtlich China zeigt sich, dass die maßgeblichen Ministerien MIIT und MOST noch nicht einer Meinung sind. Während das MIIT für das Jahr 2015 und auf Batteriemodulebene 150 Wh/kg und 250 €/kWh anvisiert, erwartet das MOST nur 120 Wh/kg, aber ambitionierte 180 €/kWh. Diese Kosten erwartet das MIIT für Batteriezellen wiederum erst für das Jahr 2020, dann aber mit einer Energiedichte von 300 Wh/kg.^{12,13} Die USA haben bislang eine untergeordnete Rolle in der Batterieproduktion gespielt, setzen sich aber für die kommenden Jahre besonders ambitionierte Ziele. Das DOE nennt für das Jahr 2014 200 Wh/kg sowie 230 €/kWh und für das Jahr 2020 250 Wh/kg sowie 100 €/kWh als Zielwerte für Batteriezellen.¹⁴

Für Deutschland definierte die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) Zielwerte auf Systemebene. Für das Jahr 2014 werden 105 Wh/kg und 400 €/kWh erwartet, für das Jahr 2017 110 Wh/kg sowie 300 €/kWh und für das Jahr 2020 130 Wh/kg sowie 280 €/kWh.¹⁵ Diese Zielwerte korrelieren sehr gut mit den im Rahmen der vorliegenden Technologie-Roadmap mit renommierten Experten im Auftrag des BMBF erarbeiteten Werten für die Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien der dritten Batteriegeneration. Für das Jahr 2015 wurden 110 Wh/kg und 475 €/kWh dokumentiert. Für das Jahr 2020 werden in Hinsicht auf die Hochvolt (5 V)-Lithium-Ionen-Batterien 126 Wh/kg sowie 400 €/kWh erwartet. Für die Lithium-Schwefel-Batterien (Li-S) als Teil der vierten Batteriegeneration bzw. Post-Lithium-Ionen-Batterien (Post-LIB) werden 315 Wh/kg sowie 250 €/kWh

erwartet. Für das Erreichen der Marktreife werden allerdings noch weitere Parameter zu berücksichtigen und optimieren sein, wie z. B. Lebensdauer und Sicherheit.

Auf Zellebene, und somit im direkten Vergleich zu den zuvor genannten Regierungszielen, zeigt sich allerdings, dass die deutschen Zielwerte deutlich unter den Zielen der weltweit führenden Länder liegen. Die vorliegende Technologie-Roadmap dokumentiert basierend auf Zellen der dritten Batteriegeneration für das Jahr 2015 147 Wh/kg und 380 €/kWh und für das Jahr 2020 168 Wh/kg und 320 €/kWh. Mit Batteriezellen der vierten Batteriegeneration könnten jedoch durch die Lithium-Schwefel-Technologie bis 2020 420 Wh/kg und weniger als 200 €/kWh erreicht werden (ähnliche Zielwerte für diese Technologie werden aber auch von anderen Ländern genannt, z. B. China). Somit werden

sich nach Ansicht der Experten wirkliche Technologiesprünge bei der Energiedichte erst jenseits 2020 mit Post-LIB erreichen lassen. Eine deutliche Kostenreduktion ist an das Erreichen größerer Produktionszahlen und somit an den Markthochlauf von Lithium-Ionen-Batterien in Elektrofahrzeugen gebunden. Interessant ist vor allem, dass sich viele Nationen weltweit an den japanischen Zielwerten zu orientieren scheinen. Während sich China und Südkorea mittelfristig den Entwicklungszielen Japans annähern bzw. diese sogar übertreffen wollen, setzen sich die USA gerade kurzfristig noch anspruchsvollere Ziele. Deutschland verhält sich im internationalen Vergleich vorsichtiger mit seinen Zielwerten hinsichtlich Energiedichte und Kosten. Der Fokus liegt hierzulande eher auf Batterien mit hoher Qualität, Zuverlässigkeit sowie Sicherheit, um nachhaltig durchsetzungsfähige Batterietechnologien zu entwickeln.



BATTERIEBETRIEBENE ELEKTROMOBILITÄT VS. BRENNSTOFFZELLENTECHNOLOGIE

DIE BRENNSTOFFZELLE IM RAHMEN DIESER ROADMAP

Die Brennstoffzelle repräsentiert einen Energiewandler und kann deshalb nicht für sich selbst stehen. Deshalb wurde in der Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030 die folgende Arbeitsdefinition zugrunde gelegt. Es handelt sich um das für den Einsatz in Fahrzeugen favorisierte System der sogenannten Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEM-FC) als Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle mit Stack und Wasserstoff-Tank.¹⁶ Mit dieser Beschreibung ist das System mitsamt seinen Eigenschaften (siehe Textbox auf Seite 7) näherungsweise vergleichbar mit den anderen Energiespeichertechnologien in der Technologie-Roadmap und deren Bewertung.

Wirklich praktikable alternative Brennstoffzellentechnologien gibt es für die Elektromobilität nicht. Alkalische Brennstoffzellen arbeiten zwar bei niedrigen Betriebstemperaturen, erreichen aber aufgrund begrenzter Materialstabilitäten nicht die notwendigen Betriebsdauern und kommen deshalb nur für den Einsatz in Nischenbereichen in Frage. Die Phosphorsäure-Brennstoffzelle, die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle und die Festoxid-Brennstoffzelle werden aufgrund ihrer hohen Betriebstemperaturen mit bis zu 750°C nicht als relevante Technologien für den Einsatz in elektromobilen Systemen gesehen.

Eine technologische Alternative der PEM-FC ist die Direktmethanol-Brennstoffzelle, in der anstelle von Wasserstoff Methanol als Brennstoff verwendet wird. Der direkte Einsatz von flüssigem Methanol erleichtert die Speicherung des Brennstoffs, so dass das Gesamtsystem aus Brennstoffzelle und Speicher eine fünf-fach höhere Energiedichte aufweist als Lithium-Ionen-Batterien.

Wesentliche Schwierigkeiten liegen in dem aufwändigen Einsatz von Katalysatoren und den Verlusten, die durch die direkte Diffusion von Methanol durch die Membran entstehen.^{17,18} Die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff dagegen stellt eine technisch noch zu verbessernde Herausforderung dar – die Masse der in Frage kommenden Tanks ist relativ zur transportierten Energiemenge groß, was auch die Reichweite der Fahrzeuge begrenzt.¹⁹

Auch aus der Ressourcenbetrachtung entsteht eine Kostenfrage (Stichwort: Wasserstoffproduktion): Der Wirkungsgrad bei den Brennstoffzellen-Systemen liegt bei ca. 60 Prozent, was auch von Brennstoffzellenfahrzeugen annähernd erreicht werden kann, wobei kein Zykluswirkungsgrad für den Wasserstoff angegeben, sondern nur der Entladungsfall betrachtet wurde. Unter Einbezug der Wasserstoffproduktion sinkt der Wirkungsgrad. Selbst unter der Annahme, dass der eingesetzte Strom zu 100 Prozent aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird, sind noch Verluste durch den Elektrolyse-Wirkungsgrad sowie die Konditionierung und den Transport des Wasserstoffs einzubeziehen. Insgesamt ergibt sich somit ein Wirkungsgrad von ca. 35 Prozent in der Well-to-Wheel-Analyse²⁰, und damit ist die Energiebilanz der Brennstoffzellenfahrzeuge nicht so gut wie die für die Batteriefahrzeuge (siehe Seite 11).

Eine weitere große Herausforderung für die Durchsetzung dieses Systems am Markt liegt in der Bereitstellung einer flächendeckenden Wasserstoff-Infrastruktur, vergleichbar mit der heutigen Tankstelleninfrastruktur. Diese aufzubauen stellt besonders in der Anfangsphase eine Herausforderung dar, weil sie kapitalintensiv und in den ersten Jahren unterausgelastet ist. Für eine flächendeckende Versorgung könnten sich die Erstinvestitionen auf drei Milliarden Euro belaufen und damit die Wasserstoffproduktion, den Vertrieb und den Einzelhandel umfassen.²¹ Die Batterie wird hingegen überwiegend zu Hause oder am Arbeitsplatz geladen werden und kann vor allem zu Beginn noch auf die bereits vorhandene Infrastruktur zurückgreifen. Im Vergleich zum Aufbau der Ladeinfrastruktur für Lithium-Ionen-Batterien sind die notwendigen Investitionen für die Wasserstoff-Infrastruktur also deutlich höher.

Unter den Experten besteht Konsens darüber, dass Fortschritte in der Batterietechnologie kaum ausreichen dürften, um der Elektromobilität hinsichtlich aller Fahrzeugtypen und Nutzungsprofile zum Durchbruch zu verhelfen. Mit den heute verfügbaren Batterien ließe sich die Reichweite von BEV bis 2020 bestenfalls verdoppeln. Deshalb sprechen sie sich dafür aus, Batterien und die Brennstoffzelle nicht nur als Konkurrenz-, sondern auch als mögliche Komplementärtechnologien zu beobachten.

Während die Lithium-Technologien für eher kürzere Reichweiten und kleinere Fahrzeuge geeignet sind, werden Brennstoffzellen für größere Fahrzeuge und lange Reichweiten langfristig die wohl besten technologischen Eigenschaften bieten. Beide Ansätze scheinen für ihre spezifischen Einsatzbereiche nahezu konkurrenzlos bzw. nur in Konkurrenz mit dem Verbrennungsmotor zu sein. Sie gelten aus heutiger Sicht als Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität. Als Hybrid-Technologien bieten sie eine Chance, beide Einsatzfelder zu erschließen. Eine Kompromiss-Lösung wäre also das PHEV-Fahrzeugkonzept oder der Einsatz von Range Extendern.

Erste Kunden scheinen die Brennstoffzellenfahrzeuge anzunehmen. Bei BEV spielt die begrenzte Reichweite für die Akzeptanz der Kunden eine Rolle, obwohl diese mittlerweile mehr als 100 Kilometer betragen kann. Kleinfahrzeuge sind allerdings aufgrund der kompakten Bauweise nur schwierig mit Brennstoffzellen-Systemen auszustatten, weshalb die Lithium-Batterien hier Vorteile haben.

Die oben geschilderten Zusammenhänge genau wie der Vergleich von Eigenschaften verschiedener Antriebskonzepte (siehe Tabelle) zeigen, dass Fahrzeuge mit Brennstoffzelle bereits heute einige Vorteile gegenüber PHEV und BEV haben. Dazu gehören beispielsweise der höhere Energieinhalt im Tank (bzw. die höhere Energiedichte), die damit deutlich höhere Reichweite und die viel geringere Tankdauer. Vorteile der batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeuge liegen im deutlich höheren Wirkungsgrad sowie der höheren Leistungsdichte. Hinsichtlich der Energiedichte steht somit schon fest, dass auf Lithium-Batterien basierende Fahrzeugkonzepte erst mit der vierten Batteriegeneration (und einer deutlich erhöhten Energiedichte) bezüglich hoher Reichweiten konkurrenzfähig werden. Diese wird jedoch von den meisten Experten nicht vor dem Jahr 2025 bzw. 2030 in Marktreife erwartet.

Referenzsystem: Die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEM-FC)

(siehe Roadmap-Doppelseite 8 und 9)

Die Energiedichte der PEM-FC liegt bei 450–500 Wh/l bzw. 1100 Wh/kg und damit deutlich über den heute aber auch in absehbarer Zukunft mit Lithium-Systemen erreichbaren Energiedichten. Mit dem definierten Referenzfahrzeug (im Auto: 400–500 km Reichweite, Mittelklasse, Kleinserie mit mehr als 5000 Fahrzeugen/Jahr) ist eine Fahrleistung von 250 000 km möglich, die Lebensdauer ist auf zehn Jahre ausgelegt. Von den Fahrzeugherstellern werden schon heute Lebensdauern von 2000 Betriebsstunden garantiert²², was einer Fahrleistung von ca. 100 000 km entspricht. Lebensdauern von 5000–6000 Betriebsstunden werden in den nächsten Jahren erwartet. Die tolerierbaren Umgebungsbedingungen liegen bei -25 °C (tiefe T) und +90 °C (hohe T). Die Sicherheitsangabe bezieht sich auf den Wasserstoff im Drucktank.

Die Brennstoffzelle wird im Automobil in Kombination mit einer Druckspeicherung von Wasserstoff ab dem Jahr 2014 in Serienherstellung erwartet. Größere Stückzahlen mit der Brennstoffzelle im Automobilbau sind ab dem Jahr 2020 zu erwarten. Eine platinfreie Brennstoffzelle wird es laut Experteneinschätzung wohl nie geben. Gleichwohl wird sich der Trend zur Platinreduktion in Brennstoffen im Rahmen der fortlaufenden Entwicklung auch bis bzw. über das Jahr 2017 hinaus fortsetzen. Die Systemkosten liegen heute bei 150 €/kWh, wobei für den Vergleich zwischen den Referenzsystemen die Kosten für die Brennstoffzelle auf Basis des oben definierten Referenzfahrzeugs in Euro pro Kilowattstunde umgerechnet wurden. Bei 100 000 Einheiten/Jahr sinken die Kosten auf 100 €/kWh (diese Kosten könnten um 2020 erreichbar sein).

Ausgewählte Eigenschaften verschiedener Antriebstechniken²³

Eigenschaft	Benzin-Fahrzeug	Plug-In Hybrid	Lithium-Ionen-Batteriefahrzeug	Brennstoffzellen-fahrzeug
Abkürzung	ICE	PHEV	BEV	FCEV
Energieinhalt (Tank)	445 kWh	200 + 10 kWh	24 kWh	140 kWh
Volumen (Tank)	50 Liter	25 + 50 Liter	90 bis 170 Liter	120 bis 180 Liter
Gewicht (Tank)	37 kg	20 + 100 kg	150 bis 250 kg (Zelle + System)	4 + 80 kg (Kraftstoff + System)
Reichweite	> 700 km	50 + 600 km	< 150 km	~ 400 km
„Tank“-Häufigkeit	Alle 2 Wochen	Jeden Tag + alle 2 Wochen	Alle 3 Tage voll, 30 % jeden Tag	Alle 1 bis 2 Wochen
„Tank“-Dauer	3 Minuten	3 Minuten + 2 Stunden	0,5 bis 8 Stunden	3 Minuten

ZEIT →		2011		KURZFRISTIG	2015			
		Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	
EIGENSCHAFTEN	Energiedichte	Zelle	140	230	k. A.	k. A.	147	242
		System	105	170	1.100	450-500	110	179
	Leistungsdichte	Zelle	600	900	k. A.	k. A.	630	945
		System	400	650	k. A.	k. A.	420	683
	Lebensdauer	Betriebs-Lebensdauer (Zyklusbeständigkeit)	2.500-3.500 Zyklen		250.000 Kilometer	2.500 Zyklen		
		Kalendarische Lebensdauer	10 Jahre		10 Jahre	<10 Jahre ●		
	Umgebungsbedingungen (Temperatur)	hohe Temp.: +50 °C tiefe Temp.: -25 °C		hohe Temp.: +90 °C tiefe Temp.: -25 °C	hohe Temp.: +50 °C tiefe Temp.: -25 °C			
	Sicherheit (EUCAR-Level)	≤4		H ₂ -Sicherheit	≤4 ●			
	Kosten	Zelle	400 €/kWh		k. A.	380 €/kWh		
		System	500 €/kWh		150 €/kWh	475 €/kWh		
Wirkungsgrad	>90 %		60 %	>90 %				
Herausforderungen					Lebensdauer/ Sicherheit ggf. erst >2015 erreicht ●			
ENERGIESPEICHER	Li-basiert	Referenzsystem: Li-Ionen-Batterie (4 V)		4,3 V Li-Ionen	4,4 V Li-Ionen ●			
	Brennstoffzelle			PEM-FC Nafion/Pt	PEM-H ₂ (Druck) 400-500 km Range Kleinserien >5000 E/a ●	Stack + System + H ₂ -Tank (Druck) 140 kWh		
	Nicht Li-basiert	Ni / MH	Pb			Zn-Luft (mechanisch nachladbar)		

TECHNOLOGIE-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030

MITTLERFRISTIG		2020				LANGFRISTIG		2030/>2030	
Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)
161	265	420	345	161	265	168	276		
≤121	≤196	315	255	116	187	126	204		
690	1.035	400 ●	300 ●	<600	<900	720	1.080		
≤460	≤748	250 ●	200 ●	<400	<650	480	780		
~500 Zyklen ●	≤1.000 Zyklen ●	<1.000 Zyklen	1.500 Zyklen						
<10 Jahre ●	k. A.	k. A.	<10 Jahre ●						
hohe Temp.: +50 °C tiefe Temp.: -25 °C	hohe Temp.: +65 °C tiefe Temp.: -50 °C	hohe Temp.: +80 °C ● tiefe Temp.: +50 °C ●	hohe Temp.: +50 °C tiefe Temp.: -25 °C						
≤4	≤4 ●	≤2 ●	≤4 ●						
≥400 €/kWh	<200 €/kWh	k. A.	320 €/kWh						
≥500 €/kWh	250 €/kWh	k. A.	400 €/kWh						
>90 %	ca. 75 %	ca. 90 %	>92 %						
Zyklenfestigkeit/ Lebensdauer ggf. erst >2015 erreicht ●	Leistungsdichte/ Zyklenfestigkeit/ Sicherheit ggf. erst >2020 erreicht ●	Thermomanagement ist zu beobachten. Sicherheit von ≤2 ist Voraussetzung, damit Konzept sinnvoll. ●	Lebensdauer/ Sicherheit ggf. erst >2020 erreicht ●						
●●●●●●●● Li-Legierung/ C-Komposit >800 mAh/g ●	●●●●●●●● Li-S ●	●●●●●● Li-Polymer ●	●●●●●● Li-Feststoff (nicht polymer) ●	●●●●●● 5 V Li-Ionen ●	●●●●●● Li-Luft ●				
● PEM-FC H ₂ Pt-reduziert			●●●●●● PEM-H ₂ (Druck) 400- 500 km Range Kleinserien >20 000 E/a						
			●●●●●● Zn-Luft (wiederauf- ladbar)						

Zeitraumen
Frage nach Marktreife der Technologien auf Systemebene (nicht im Fahrzeug), Bewertung der Eigenschaften im Vergleich zum Referenzsystem

Referenzsystem
LIB im Automobil; 4 Volt sowie NMC- oder LFP-Kathode und Graphit-Anode, PHEV: 5 kWh; Range Extender: ~10 kWh; BEV: >15 kWh

- Auswahl bestimmter aussichtsreicher Zelltypen durch Teilnehmer
- Im Workshop bewertet
- Schlüsselparameter

„Die Quantifizierung künftig zu erwartender Leistungsdaten verdeutlicht, wie Post-LIB-Technologien wie die Li-S-Batterietechnologie ab 2020 zu Technologiesprüngen führen könnten.“

Prof. Dr. Andreas Jossen, TU München

„Die Roadmap gibt wichtige Impulse für die Entwicklung von Energiespeichern für die Elektromobilität, sie zeigt die relevanten Entwicklungspfade über die verschiedenen Batteriegenerationen hinweg.“

Dr. Rüdiger Oesten, BASF SE

ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT

ALLGEMEINE EINFÜHRUNG

In der Technologie-Roadmap sind die technologischen Entwicklungen Lithium-basierter Systeme im Zeitraum von 2011/2012 bis 2030 und darüber hinaus abgeschätzt. Um die Technologien in der vorliegenden Roadmap zeitlich einordnen zu können, wurde der Markteintritt auf der Ebene elektrochemischer Systeme zugrunde gelegt, also nach der Zellentwicklung, aber noch vor dem Einsatz in Elektrofahrzeugen. Bei einigen Technologien wurde zwischen einer technischen Hochskalierung oder nach Stückzahlen z. B. für Brennstoffzellen differenziert und damit zwischen Klein- oder Großserienproduktion unterschieden.

Als weitere technologische Option neben den Lithium-basierten Systemen ist die Brennstoffzellentechnologie in der Roadmap aufgenommen (siehe Diskussion auf Seiten 6 und 7). Als elektrochemische Referenztechnologie wurden Lithium-Ionen-Batterien mit einer Kathode aus Nickel-Mangan-Kobalt (englisch: „nickel-manganese-cobalt“, kurz: NMC) oder Lithium-Eisen-Phosphat (englisch: „lithium iron phosphate“, kurz: LFP), einer Anode aus Graphit (für den Einsatz mit 4 V) für den Einsatz in PHEV (mit ~5 kWh Kapazität), mit Range Extender (mit ~10 kWh Kapazität) bzw. reine BEV (mit ~15 kWh Kapazität) herangezogen. Für die Bewertung wurden die Fahrzeugkonzepte von PHEV und BEV mit entsprechender Kapazität in der Größenordnung von 5 bis 15 kWh zugrunde gelegt, und dabei kleine (z. B. Mikro-, Mild- oder Vollhybride) sowie größere Anwendungen (z. B. Hybrid-Busse) ausgeschlossen, da hierfür z. T. andere Leistungsparameter im Vordergrund stehen und zu optimieren sind.

Die Experten haben die folgenden, als besonders aussichtsreich für den oben genannten Einsatzbereich erachteten Systeme auf ihre erreichbaren Eigenschaften bewertet:

- Lithium-Ionen-Batterien (mit NMC oder LFP sowie Graphit/4 V) als elektrochemische Referenztechnologie
- Brennstoffzelle PEM-FC mit Stack und Wasserstoff-Druckspeicher als alternative Referenztechnologie ab dem Jahr 2014

- 4,4 V-Lithium-Ionen-Systeme um etwa 2015
- Lithium-basiertes System mit Lithium-Legierungen/Kohlenstoff-Kompositen nach 2015
- Lithium-Schwefel-Systeme um 2020
- Lithium-Polymer-Systeme um 2020
- 5 V-Lithium-Ionen-Systeme nach 2020

Folgende Parameter der Eigenschaften wurden dokumentiert:

- Energiedichte (auf Zell- und Systemebene sowie gravimetrisch in Wh/kg und volumetrisch in Wh/l)
- Leistungsdichte (auf Zell- und Systemebene sowie gravimetrisch in W/kg und volumetrisch in W/l)
- Lebensdauer (Betriebslebensdauer in Zyklen und kalendarische Lebensdauer in Jahren)
- Umgebungsbedingungen (toleriertere hohe und tiefe Temperaturen in °C)
- Sicherheit (in Hinsicht auf das EUCAR-Level)
- Kosten (für Zelle und System, in €/kWh)
- Wirkungsgrad in Prozent

Für eine Einschätzung der technologischen Entwicklungen ist ein Vergleich der Leistungsdaten hilfreich. Im Folgenden sind die aus heutiger Sicht erreichbaren Zahlenwerte für die herangezogenen Eigenschaften angegeben. Die hier getroffene Unterscheidung technischer Parameter und Eigenschaften auf Zell- und Systemebene liefert Ansatzpunkte über mögliche Verluste auf der Systemebene, wie etwa Verluste bei der Energie- und Leistungsdichte.

Referenzsystem: Die 4 V-Lithium-Ionen-Batterie

(siehe Roadmap-Doppelseite 8 und 9)

Die mit dem Referenzsystem erzielbaren Werte für Energie- und Leistungsdichten sind in der Roadmap verortet. Darüber hinaus verbesserte Systeme müssen insbesondere höhere Energiedichten erzielen. Für das Referenzsystem werden nach Angaben der Experten 40–50 Amperestunden bei einer Peak-Dauer von 10 Sekunden benötigt. Die Angaben beziehen sich daher im Allgemeinen auf die Peak-Leistung.

Die Zyklen des Referenz-Systems liegen bei 2500 bis 3500 Zyklen. Die kalendarische Lebensdauer beträgt zehn Jahre. Die tolerierbaren Umgebungsbedingungen sind hinsichtlich der hohen Temperatur +50 °C und hinsichtlich der tiefen Temperatur -25 °C. Bezüglich der Sicherheit liegt der EUCAR-Level bei 4. Der brennbare Elektrolyt ist dabei kritisch für die Sicherheitseigenschaften. Bedingung für verbesserte Systeme ist daher mindestens das gleiche Sicherheitslevel – oder besser.

Die Kosten liegen laut der Experten mit einer Fertigung von ein bis zwei Millionen Zellen pro Jahr bei etwa 400 €/kWh. Eine Kostenreduktion sei nur dann erreichbar, wenn Spannungen über 5 Volt erzielt werden, bzw. durch eine Erhöhung der Energiespeicherdichte, gleichbedeutend mit einer Reduktion der Zellenzahl im System. 70 bis 80 Prozent der Kosten ver-

ursachen die Zellen, der Rest gehe auf das System zurück. Produktions- und Stückzahleneffekte könnten die Zellkosten nur auf 60 bis 70 Prozent reduzieren. Eine spürbare Senkung auf Zellebene erreiche man somit nur durch eine Erhöhung der Energiespeicherdichte. Die Kosten auf Systemebene liegen nach Experteneinschätzung für das Referenz-System in einer Fertigung von 20 000 Einheiten pro Jahr bei 500 €/kWh.

Der Wirkungsgrad des Referenzsystems beträgt mehr als 90 Prozent. Aktuelle Well-to-Wheel-Analysen für BEV ergeben selbst unter Berücksichtigung aller auftretenden Verluste zum Beispiel bei der Stromleitung und beim Beladen in der Summe zwischen 70 und ca. 80 Prozent Wirkungsgrad^{24,25}, welche durch den Einsatz von 100 Prozent erneuerbaren Energien erreicht werden können und umso stärker absinken, je mehr konventionelle Energiequellen eingesetzt werden. Dies übertrifft selbst Fahrzeugkonzepte mit den besten Verbrennungsmotoren deutlich und damit auch Brennstoffzellenfahrzeuge. Es ist zu beachten, dass alle Angaben nur für BEV gelten. Bei Hybridelektro kraftfahrzeugen (HEV) und PHEV liegen die Kosten bis zu einem Faktor von 2 höher, da u. a. weniger Zellen im Batteriesystem verbaut werden und damit der Systemanteil größer ausfällt.



LITHIUM-BASIERTE ENERGIESPEICHER

EINFÜHRUNG IN DIE FuE VON LITHIUM-IONEN-HOCHVOLT-BATTERIESYSTEMEN

In der bereits veröffentlichten „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ verteilt sich die Technologieentwicklung der Hochvoltzellen ausgehend von dem zuvor definierten Referenzsystem der Lithium-Ionen-Batterien mit 4 Volt bis hin zu 5 V-Zellen vor 2020.

Die Entwicklung von Zellen auf Basis von LTO-Anodenmaterial und einem 5 V-Kathodenmaterial (im Folgenden als LTO/5 V-Zellen bezeichnet) wird nicht vor dem Jahr 2013 bis 2014 abgeschlossen sein. Die großtechnische Verfügbarkeit des Elektrolyten dürfte sogar noch weiter in der Zukunft liegen. Die Experten rechnen mit dessen Verfügbarkeit nach 2015 (siehe auch 5 V-Elektrolyt in der „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“). Unter der LTO/5 V-Zellentwicklung ist daher die Entwicklung des 5 V-Kathodenmaterials mit einem kompatiblen Elektrolyten zu verstehen. Auf Systemebene und ohne Spezifizierung der Zellchemie ist hingegen mit einer kontinuierlichen Verbesserung bzw. Staffelung zu rechnen. So wird mit der Entwicklung von 4,3 V-Systemen ab 2012, von 4,4 V-Systemen ab 2015 und von 5 V-Systemen ab 2020 gerechnet. Mit welchen Zellchemien diese Entwicklungen zu erreichen sind, steht allerdings noch offen. Hinweise hierzu bietet die „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“.

4,4 V-SYSTEM UM 2015

Das 4,4 V-System liefert gegenüber dem Lithium-Ionen-Batterien-Referenzsystem etwa 5 Prozent mehr spezifische Energie. Gleiches gilt für die Leistungsdichte. Mit dem 4,4 V-System sollten 2500 Zyklen erreichbar sein. Die kalendarische Lebensdauer hängt von der Qualität des Elektrolyts ab. Für das 4,4 V-System stellt die Lebensdauer einen unbedingt durch weiterführende FuE zu erreichenden Schlüsselparameter dar. Wenn die Lebensdauer des 4,3 V-Systems die Marke von zehn Jahren beim Einsatz in BEV bis 2015 nicht erreichen kann, wären längere Entwicklungszeiten notwendig, und die Markteinführung würde

sich entsprechend verschieben. Die tolerierbaren Umgebungsbedingungen liegen bei -25°C (tiefe T) und $+50^{\circ}\text{C}$ (hohe T). Die Sicherheit markiert einen zweiten kritischen Parameter, sie muss zumindest gleich hoch sein wie die des Referenzsystems. Automobilhersteller werden nur aus Kostengründen kein anderes System einbauen, wenn dies die Lebensdauer verringern und die Sicherheit vermindern würde. Die Kostenreduktion (Zelle und System) gegenüber dem Referenzsystem beträgt deshalb vermutlich weniger als 5 Prozent, da gleichzeitig auch teurere Materialien verwendet werden müssen. Der Wirkungsgrad des 4,4 V-Systems wird bei mehr als 90 Prozent liegen, vollständige Well-to-Wheel-Analysen für BEV liegen im Moment aber nur für die Referenzsysteme vor und werden im vorderen Teil dieser Broschüre behandelt. Das 4,4 V-System stellt daher nur bzw. erst dann eine Alternative dar, wenn eine mit dem Referenzsystem vergleichbare Lebensdauer (zehn Jahre) und Sicherheit (EUCAR-Level 4) erreicht werden können.

LITHIUM-LEGIERUNG/KOHLENSTOFF-KOMPOSIT-SYSTEM NACH 2015

Die Verbesserungen mit Fokus auf der gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte dürften bei jeweils plus 15 Prozent auf Zellebene und bei plus 15 Prozent auf Systemebene liegen. Das Kathodenmaterial bleibt unverändert, man verwendet nur eine bessere Anode mit 30 bis 50 Prozent mehr spezifischer Energie. Bis 2015 könnten ca. 500 Zyklen erreicht werden, heute sind etwa 200 relativ stabile Zyklen möglich. Die Zyklenzahl fällt damit deutlich niedriger aus als beim 4,3 V-System (deutlich kleiner als 2500 Zyklen). Für die Lithium-Legierung/Kohlenstoff-Komposit-Systeme stellt die Zyklenzahl einen möglichen Schlüsselparameter dar. Evtl. erfordert dies eine längere Entwicklungszeit über 2015 hinaus, um die Marke von etwa 2500 Zyklen und zehn Jahren Lebensdauer zu erreichen. Die tolerierbaren Umgebungsbedingungen liegen bei -25°C (tiefe T) und $+50^{\circ}\text{C}$ (hohe T). Die Sicherheit (EUCAR-Level 4) dürfte mit dem System erreichbar sein. Sie stellt keinen kritischen Parameter dar. Die Komposit-Herstellung ist sehr kostenintensiv. Kostenreduktionseffekte ergeben sich aber auf Systemebene, da durch die zunehmend

höhere Energiedichte von Batteriezellen weniger Zellen im Batteriesystem verbaut werden müssen. Sowohl Zell- als auch Systemkosten werden voraussichtlich leicht über den Kosten des Referenzsystems liegen. Der Wirkungsgrad dürfte bei mehr als 90 Prozent liegen. Das Li-Legierung/C-Komposit-System stellt daher nur bzw. erst dann eine Alternative dar, wenn eine mit dem Referenzsystem vergleichbare Lebensdauer (um 2500 Zyklen und zehn Jahre Lebensdauer) erreicht werden kann. Ähnlich der Staffelung der Elektrolyte nach Spannung bei den Hochvolt-Systemen ließen sich auch Anodenmaterialien z.B. nach ihrer spezifischen Kapazität bei den Systemen mit Li-Legierungen/C-Kompositen staffeln. Ab 2017 sind beispielsweise spezifische Kapazitäten kleiner als 800 mAh/g zu erwarten. Dieses System ist in der Roadmap enthalten.

LITHIUM-SCHWEFEL-SYSTEM VOR 2020

Die Lithium-Schwefel-Batterie (Li-S) gibt es bereits heute. Vor 2017 wird sie allerdings aus Sicht der Experten kaum mehr als 100 Zyklen halten können. Einen Meilenstein dürfte 2017 die Verfügbarkeit von Li-S-Zellen mit 10 Amperestunden darstellen. Die Verfügbarkeit von Systemen erwarten die Experten bis 2020, den Einsatz der Batterie im Elektromobil aber nicht vor 2030. Die zeitliche Verortung der Technologien ist mit Unwägbarkeiten behaftet. Wäre die Marktreife einer Technologie bekannt, ließe sich ihre Entwicklung bis auf die einzelne Zelle herunterbrechen. Die Unkenntnis erzeugt zeitliche Sprünge, die wohl in Kauf genommen werden müssen. Daher zeigt sich bei Li-S-Batterien (wie auch bei Li-Luft-Batterien) eine große Unsicherheit über die tatsächliche Entwicklung der Technologien über die Zeit.

Die Energiedichte des Li-S-Systems kann um den Faktor 4 größer sein als im Referenzsystem. Die vierfache Energiedichte lässt sich allerdings nur bei der bestmöglichen Zelle erreichen. Diese ist nicht automatisch auch für den Einsatz im Elektromobil geeignet. Realistisch erscheint ein Verbesserungsfaktor von 1,5 (volumetrisch) bis 3 (gravimetrisch) für Zelle und System beim Einsatz des Li-S-Systems im Automobil. Die Leistungsdichte der Zelle verschlechtert sich gegenüber dem Referenzsystem merklich und ist damit ein Schlüsselparameter zur Durchsetzung der Technologie. Die erreichbare Zyklenzahl liegt bei ungefähr 1000 und stellt einen weiteren Schlüsselparameter dar. Die kalendarische Lebensdauer des Li-S-Systems erscheint derzeit kaum seriös abschätzbar. Die tolerierbaren Umgebungsbedingungen liegen bei -50°C (tiefe T) und $+65^{\circ}\text{C}$ (hohe T). Die Sicherheit stellt ein großes Problem dar und ist somit als Schlüsselparameter nur schwer einzuschätzen. Ein anderes Anodenmaterial könnte notwendig sein. Die Kostenabschätzung ist unter Vorbehalt zu betrachten, ggf. enthält das 2020 erreichbare System ein Material, dessen Verfügbarkeit derzeit noch nicht gesichert ist. Das restliche System enthält günstige Komponenten und würde keine Kostenerhöhung nach sich ziehen. Es könnte nach Ansicht der Experten ein großes Kostenpotenzial vorliegen. Gleichwohl besteht große Unsicherheit, was mit den Li-S-Systemen erreicht werden kann. Die Experten schätzen die Kosten auf weniger als 200 €/kWh auf Zellebene und 250 €/kWh auf Systemebene ein. Sie erwarten in etwa eine Halbierung gegenüber dem Referenzsystem. Bezüglich des Schwefels liegt eine niedrige Zellspannung vor. Der Wirkungsgrad liegt bei 75 Prozent. Das Li-S-System stellt daher nur dann eine Alternative dar, wenn eine mit dem Referenzsystem vergleichbare Lebensdauer (insbesondere Zyklenzahl), Leistungsdichte und vor allem Sicherheit erreicht werden können.

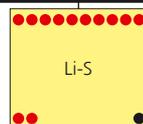


ZEIT →		2011		KURZFRISTIG	2015			
		Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	
EIGENSCHAFTEN	Energiedichte	Zelle	140	230	k. A.	k. A.	147	242
		System	105	170	1.100	450-500	110	179
	Leistungsdichte	Zelle	600	900	k. A.	k. A.	630	945
		System	400	650	k. A.	k. A.	420	683
	Lebensdauer	Betriebs-Lebensdauer (Zyklusbeständigkeit)	2.500-3.500 Zyklen		250.000 Kilometer	2.500 Zyklen		
		Kalendarische Lebensdauer	10 Jahre		10 Jahre	<10 Jahre ●		
	Umgebungsbedingungen (Temperatur)	hohe Temp.: +50 °C tiefe Temp.: -25 °C		hohe Temp.: +90 °C tiefe Temp.: -25 °C	hohe Temp.: +50 °C tiefe Temp.: -25 °C			
	Sicherheit (EUCAR-Level)	≤4		H ₂ -Sicherheit	≤4 ●			
	Kosten	Zelle	400 €/kWh		k. A.	380 €/kWh		
		System	500 €/kWh		150 €/kWh	475 €/kWh		
Wirkungsgrad	>90 %		60 %	>90 %				
Li-basiert + Brennstoffzelle	Referenzsystem: Li-Ionen-Batterie (4 V)		●●● PEM-H ₂ (Druck) 400-500 km Range Kleinserien >5000 E/a ●	●●●●●● 4,4 V Li-Ionen ●				

LITHIUM-POLYMER- / LITHIUM-FESTSTOFF- / LITHIUM-METALL-SYSTEME UM 2020

Bezüglich der Li-Feststoff- und Li-Metall-Systeme stellt sich die Frage, ob und wie Li-Metall und Lithium-leitende Feststoffe wie Polymere oder Glas bzw. Keramiken künftig eingesetzt werden können. Unklar ist, ob die Leitfähigkeit bei Raumtemperatur künftig hoch genug sein wird. Ferner ist zu diskutieren, ob ein Li-Metall-System in punkto Sicherheit im Automobil eingesetzt werden kann. Li-Metall-Systeme wurden neben Li-Polymer- und Li-Feststoff-Systemen (nicht Polymer-basiert; z. B. mit Keramik-separator) vergleichend um 2020 betrachtet. Li-Polymer- und Li-Feststoff-Systeme werden ab 2020 erwartet. Wenn bis 2018

ein zyklensfestes Material verfügbar wäre, ist es nach Ansicht der Experten wohl vorzugsweise kein metallisches Lithium, das in den Zellen vorliegt. Ab 2020 könne dann für „Lithium“ entweder Lithium selbst oder ein anderes hochkapazitives Lithium-basiertes Material stehen. Die ersten Schritte dorthin könnten bis 2020 mit Kompositen gegangen werden, danach dürften Lithium-Legierungen zum Einsatz kommen. Bei Li-Polymer-Systemen sind hinsichtlich der Energiedichte Verbesserungen zwischen 15 bis 20 Prozent gegenüber dem Referenzsystem erreichbar, auf der Systemebene liegen sie bei etwa 10 Prozent. Die Leistungsdichte wird vermutlich knapp die des Referenzsystems erreichen. Die Zyklenzahl dürfte bis 2020 bei weniger als 1000 Zyklen liegen. Die Lebensdauer ist, wie auch wie beim Li-S-System, derzeit nur schwierig zu bewerten. Dies liegt vor allem daran, dass der

MITTLERFRISTIG		2020				LANGFRISTIG		2030/>2030
Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	Gravimetrisch (Wh/kg)	Volumetrisch (Wh/l)	
161	265	420	345	161	265	168	276	
≤121	≤196	315	255	116	187	126	204	
Gravimetrisch (W/kg)	Volumetrisch (W/l)	Gravimetrisch (W/kg)	Volumetrisch (W/l)	Gravimetrisch (W/kg)	Volumetrisch (W/l)	Gravimetrisch (W/kg)	Volumetrisch (W/l)	
690	1.035	400 ●	300 ●	<600	<900	720	1.080	
≤460	≤748	250 ●	200 ●	<400	<650	480	780	
~500 Zyklen ●	≤1.000 Zyklen ●	<1.000 Zyklen	1.500 Zyklen					
<10 Jahre ●	k. A.	k. A.	<10 Jahre ●					
hohe Temp.: +50 °C tiefe Temp.: -25 °C	hohe Temp.: +65 °C tiefe Temp.: -50 °C	hohe Temp.: +80 °C ● tiefe Temp.: +50 °C ●	hohe Temp.: +50 °C tiefe Temp.: -25 °C					
≤4	≤4 ●	≤2 ●	≤4 ●					
≥400 €/kWh	<200 €/kWh	k. A.	320 €/kWh					
≥500 €/kWh	250 €/kWh	k. A.	400 €/kWh					
>90 %	ca. 75 %	ca. 90 %	>92 %					
 Li-Legierung/ C-Komposit >800 mAh/g ●	 Li-S ●	 Li-Polymer ●	 5 V Li-Ionen ●					

Zeitraumen

Frage nach Marktreife der Technologien auf Systemebene (nicht im Fahrzeug), Bewertung der Eigenschaften im Vergleich zum Referenzsystem

Referenzsystem

LIB im Automobil; 4 Volt sowie NMC- oder LFP-Kathode und Graphit-Anode, PHEV: 5 kWh; Range Extender: ~10 kWh; BEV: >15 kWh

- Auswahl bestimmter aussichtsreicher Zelltypen durch Teilnehmer
- Im Workshop bewertet
- Schlüsselparameter

Temperaturbereich beim Einsatz noch nicht hinreichend beschrieben ist. Die tolerierbaren Umgebungsbedingungen liegen bei +50°C (tiefe T) und +80°C (hohe T). Es muss ein Thermomanagement entwickelt werden, um das System betreiben zu können. Dies stellt einen Schlüsselparameter dar. Die Sicherheit steigt durch den Einsatz von Polymeren. Als Anode setzt man auf Li-Metall oder eine Legierung. Die Experten sind aber skeptisch, ob die Membran so entwickelt werden kann, dass sie zum einen Sicherheitsanforderungen genügt und andererseits auch bei tieferen Temperaturen funktioniert. Das System erscheint nach Ansicht der Experten nur dann praktikabel, wenn ein EUCAR-Level kleiner oder gleich 2 erreicht wird, also die Sicherheit deutlich erhöht wird. Die Sicherheit ist deshalb der zentrale Schlüsselparameter.

Die Kosten lassen sich derzeit noch nicht seriös abschätzen. Der Wirkungsgrad dürfte bei etwa 90 Prozent liegen. Eine eventuell notwendige erhöhte Betriebstemperatur ist stets mit thermischen Verlusten verbunden, der Wirkungsgrad sinkt. Laut Experten sind die Vorzüge in punkto Energiedichte in Verbundsystemen/Legierungen leichter auszunutzen. Nachteile ergeben sich beim Li-Polymer-System durch das notwendige Thermomanagement. Um 2020 sollte z. B. durch Maximierung der Zellspannung ein Technologievorsprung vorliegen, damit das System dann attraktiv ist. Das Li-Polymer-System bietet sich insgesamt nur dann als Alternative zum Referenzsystem an, wenn es die notwendige Sicherheit gewährleistet. Für vertiefende Analysen sollten wegen der breit gefassten Kategorie „Li-Polymer“ zunächst Referenzchemien definiert werden.

5 V-LI-IONEN-SYSTEM NACH 2020

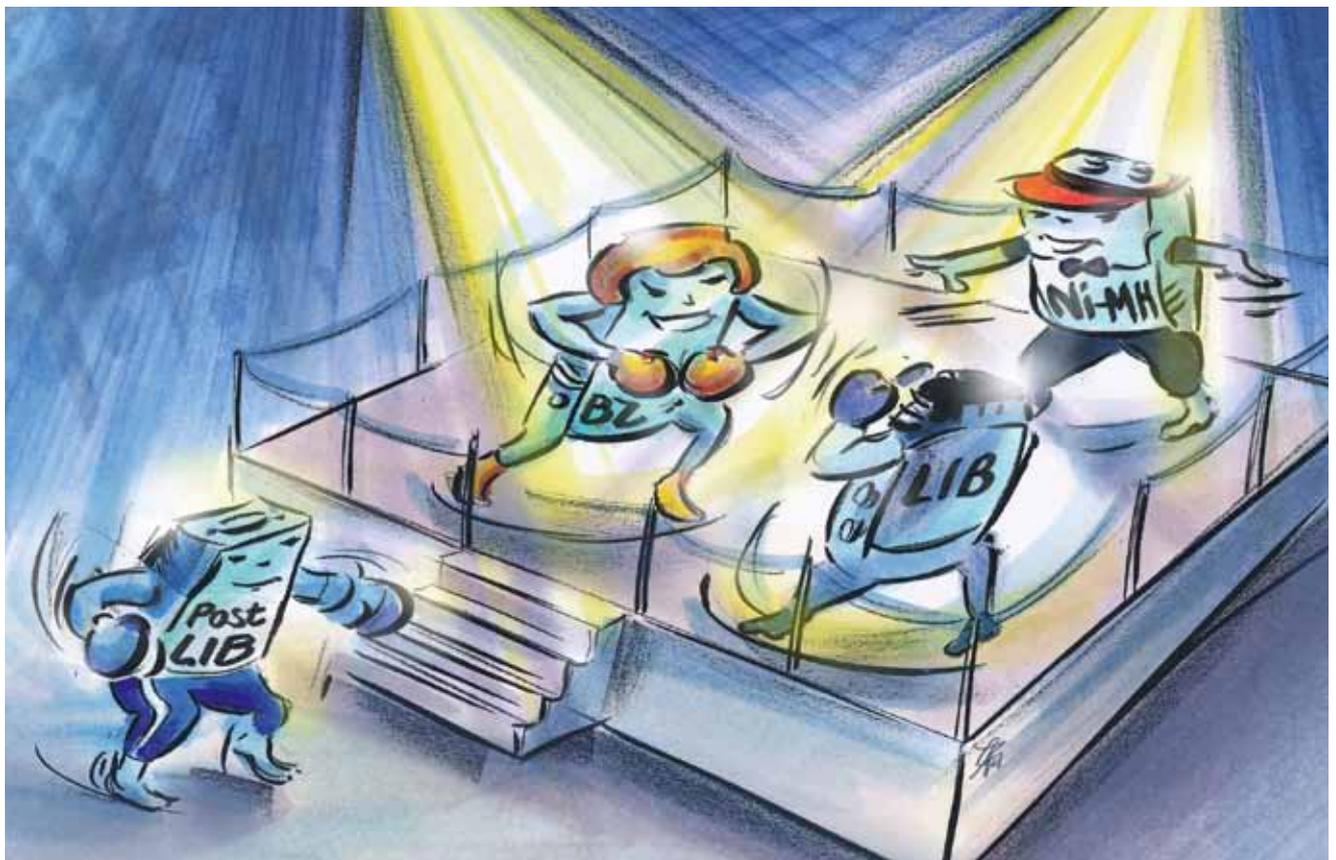
Die Energiedichte lässt sich um etwa 20 Prozent gegenüber dem Referenzsystem steigern (Zelle und System). Bei der Leistungsdichte sind Verbesserungen von ca. 10 Prozent gegenüber dem Referenzsystem erreichbar (Zelle und System). Die Zyklenzahl dürfte in der Größenordnung von 1500 liegen. Die kalendrische Lebensdauer stellt einen kritischen Parameter dar, weil derzeit noch offen ist, wie gut die Elektrolyte bis 2020 sein werden. Hier besteht die Herausforderung darin, geeignete Elektrolyte zu finden.

Die tolerierbaren Umgebungsbedingungen liegen bei -25°C (tiefe T) und $+50^{\circ}\text{C}$ (hohe T). Das zu gewährleistende Niveau an Sicherheit (EUCAR-Level 4) stellt einen weiteren Schlüsselparameter dar. Eine Kostenreduktion auf 320 €/kWh (Zelle) bzw. 400 €/kWh (System) dürfte erreichbar sein und der Wirkungsgrad bei mehr als 92 Prozent liegen.

Das 5 V-System eröffnet nur eine Alternative, wenn eine mit dem Referenzsystem vergleichbare Lebensdauer (zehn Jahre) und Sicherheit (EUCAR-Level 4) erreicht werden können. Im Vergleich zum 4,4 V-System können Energie- und Leistungsdichte verbessert und Kosten reduziert werden.

POTENZIELLE SYSTEME FÜR DIE ZEIT NACH 2030

Die Li-Luft-Technologie steht in der „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ auf Zellebene für den Zeitraum ab 2030. Durch die langen Entwicklungszeiten zur Realisierung des Systems und Einführung in der Anwendung spielen solche Technologien in Traktionsanwendungen in absehbarer Zukunft noch keine Rolle. Die Li-Luft-Batterie dürfte für elektromobile Anwendungen daher im Zeitraum deutlich nach 2030 zu erwarten sein. Aus heutiger Sicht erscheint die Realisierbarkeit der Technologie als wiederaufladbares System bis 2030 selbst auf Zellebene als sehr unsicher. Trotz der intensiven Diskussion um die Li-Luft-Batterie als Energiespeicher ist bislang noch kein schlüssiges Konzept vorhanden, und die technologischen Herausforderungen sind noch groß. Der aktuelle Stand hat die Grundlagenforschung noch nicht verlassen. Die technologische Entwicklung lässt sich schwer beurteilen. Erst in rund zehn Jahren dürften brauchbare Konzepte im Kleinen aufkommen. Nach weiteren rund zehn Jahren wäre ein Einsatz im Automobil denkbar. Die in der Technologie-Roadmap dokumentierten Entwicklungspfade beziehen sich nur auf die Komponentenebene, nicht auf die Produktebene. Für Systeme wie z. B. Li-Luft, welche jenseits 2030 erwartet werden, lassen sich aus heutiger Sicht noch keine seriösen Leistungsdaten abschätzen. Sie wurden deshalb nicht im Rahmen dieser Technologie-Roadmap bewertet.



ALTERNATIVE ENERGIESPEICHERKONZEPTE

ENTWICKLUNGEN IM TECHNOLOGIE-UMFELD UND DEREN RELEVANZ

In der Technologie-Roadmap wurden weitere Energiespeichertechnologien aufgenommen, die für die Elektromobilität relevant sein könnten. Sie wurden im Experten-Workshop allerdings aus den im Folgenden dargestellten Gründen nicht vertiefend diskutiert und für den späteren Einsatz in den Fahrzeugkonzepten PHEV und BEV ausgeschlossen. Eine Ausnahme bildet die Brennstoffzellen-Technologie, die im Rahmen dieser Technologie-Roadmap aufgeführt und vertiefend zum Einsatz in der Elektromobilität diskutiert wird, insbesondere ihre Ausprägung mit Wasserstoff als Energieträger.

Bedingt relevant – allerdings vor allem in ausländischen Märkten

Bleibatterien spielen zwar für Schwellenländer wie z. B. Indien eine sehr große Rolle, um kostengünstige Fahrzeuge herzustellen und eine breite, günstige Mobilität für die Gesellschaft zu gewährleisten. Für den deutschen bzw. europäischen Markt werden sie allerdings nicht als vielversprechend für Traktionszwecke eingestuft und gelten hier vor allem als State of the Art im Bereich der Starterbatterien. Dies liegt u. a. auch daran, dass sie bereits das Ende ihres Entwicklungspotenzials erreicht haben und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zum Beispiel hinter Lithium-Ionen-Batterien deutlich zurückstehen.

Kurzfristig relevant – allerdings nur für eine Übergangszeit

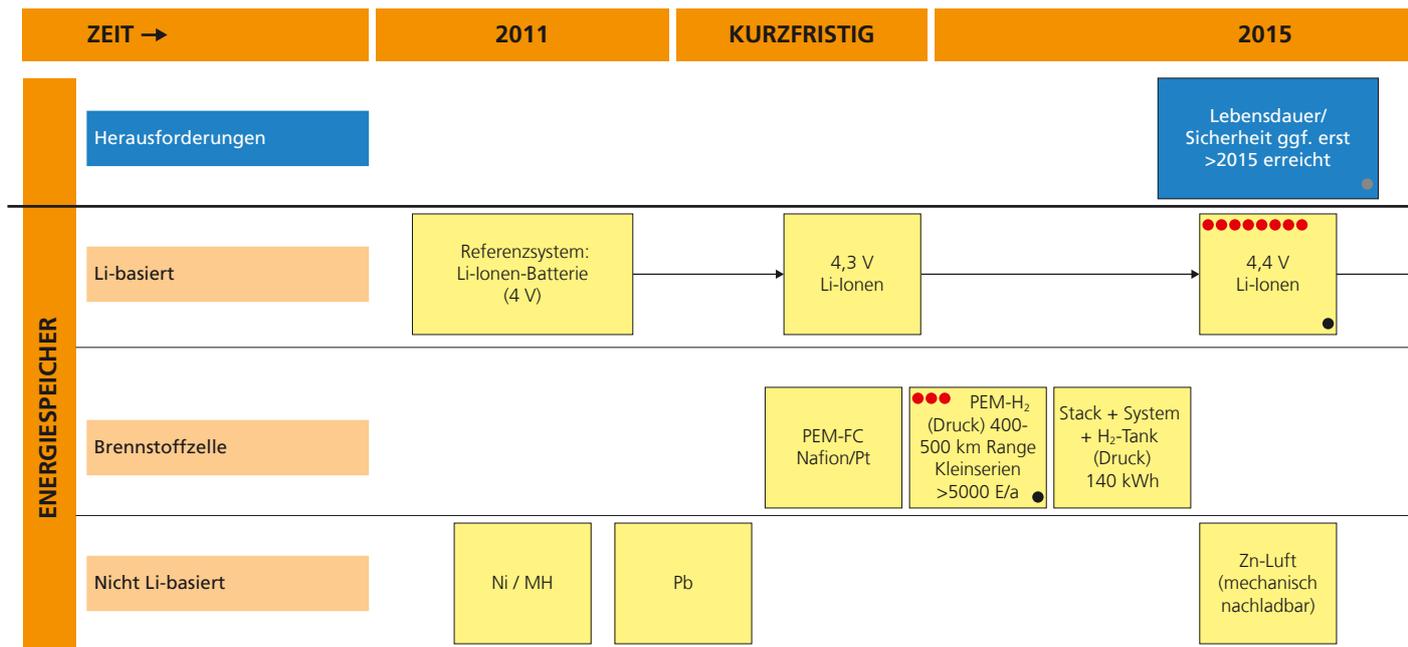
Nickel-Metallhydrid-Batterien (Ni/MH) sind speziell für HEV ausgelegt. Sie sind in der vorliegenden Technologie-Roadmap nicht detailliert ausgeführt, da HEV dafür ausgeklammert wurden. Für die Automobilindustrie bietet die Ni/MH-Batterie ein nur geringes Potenzial. Nickel und die Versorgungssituation mit diesem Rohstoff selbst bilden ein Problem. Die Ni/MH-Batterie hält dem Kostenvergleich mit der Lithium-Ionen-Batterie nicht stand,

das eingesetzte Nickel ist zu teuer. Die Materialpreise für Lithium-Ionen-Batterien liegen bereits heute unter denen der Ni/MH-Batterien. Darüber hinaus fällt auch ihre Umweltbilanz deutlich schlechter aus.

Langfristig relevant – allerdings Technologie noch nicht ausgereift

Die **Nickel-Zink-Zelle (Ni/Zn)** kommt nach Ansicht der Experten nicht vor 2020, wie sie auch auf Zellebene in der „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ dokumentiert ist. Mittlerweile mehren sich Zweifel, ob sie überhaupt eine ernsthafte Bedeutung haben wird, weshalb sie noch nicht in die Roadmap aufgenommen wurde. Da die Ni/Zn-Zelle eher als randständiges Nischenprodukt angesehen wird, sollte für deren Entwicklung kein intensives Programm aufgelegt werden. Nach langen Jahren der Forschung und Entwicklung hat keine Ni/Zn-Zelle bislang die Lebensdauer von mehr als 100 Zyklen erreicht. Damit scheint sie nicht als wieder aufladbare Batterie geeignet zu sein. Gleichwohl ist die Batterie als stationärer Speicher im MWh-Bereich (Stand 2012) bereits erhältlich.

Auch Flow-Energiespeicher wie **Vanadium-Redox-Flow-Batterien (VRFB)** sind bereits heute in kleineren Leistungsklassen erhältlich, allerdings nicht für die Elektromobilität. Solche Batterietechnologien scheinen aufgrund ihrer geringen Energiedichte eher für stationäre Speicheranwendungen relevant zu sein. Die **Redox-Flow-Batterie (RFB)** mit verbesserter Energiedichte und kalendarischer Lebensdauer im Vergleich zu kommerziell bereits heute verfügbaren Systemen wurde in der „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ um das Jahr 2020 verortet. Langfristig ist hierbei zwischen wässrigen und nicht wässrigen Speichern zu differenzieren. Nicht wässrige Batterien sind ab 2030 zu erwarten, vor allem für mobile Anwendungen. Bis 2030 werden vor allem wässrige RFB diskutiert. Für elektromobile Anwendungen würden RFB zwar den Vorteil der einfachen Betankung durch Nachfüllen der Elektrolyte und somit Vorteile bzgl. des Infrastrukturaufbaus bieten, die Energiedichte fällt allerdings gegenüber der Lithium-Ionen-Batterie deutlich schlechter aus.



Bei den Metall-Luft-Batterien wird eine konkurrenzfähige, mechanisch nachladbare **Zink-Luft-Batterie (Zn-Luft)** nicht vor dem Jahr 2015 erwartet. Nachteile betreffen die fehlende Infrastruktur sowie damit verbundene hohe Transportkosten für die Wiederaufbereitung. Die elektrisch nachladbare Zn-Luft-Batterie wird erst ab 2020 erwartet.

Die technischen Voraussetzungen für die **Magnesium-Luft-Batterie (Mg-Luft)** dürften um das Jahr 2030 erfüllt sein, und Magnesium ist als Rohstoff ausreichend verfügbar. Die mechanisch nachladbare Mg-Luft-Batterie ist vor dem Hintergrund elektromobiler Anwendungen aber ausgeklammert. Sowohl bei ihr als auch bei **Aluminium-Luft-Batterien (Al-Luft)** stellt sich die Frage, ob sie überhaupt ohne Festelektrolyten umzusetzen sind. Aus heute bereits bekannten physikalischen Gründen erscheint das unwahrscheinlich. Es sind also hohe Einsatztemperaturen notwendig, und beispielsweise für Aluminium-basierte Batterien liegt kein funktionierendes Konzept vor, das den hohen Temperaturen Stand hält.

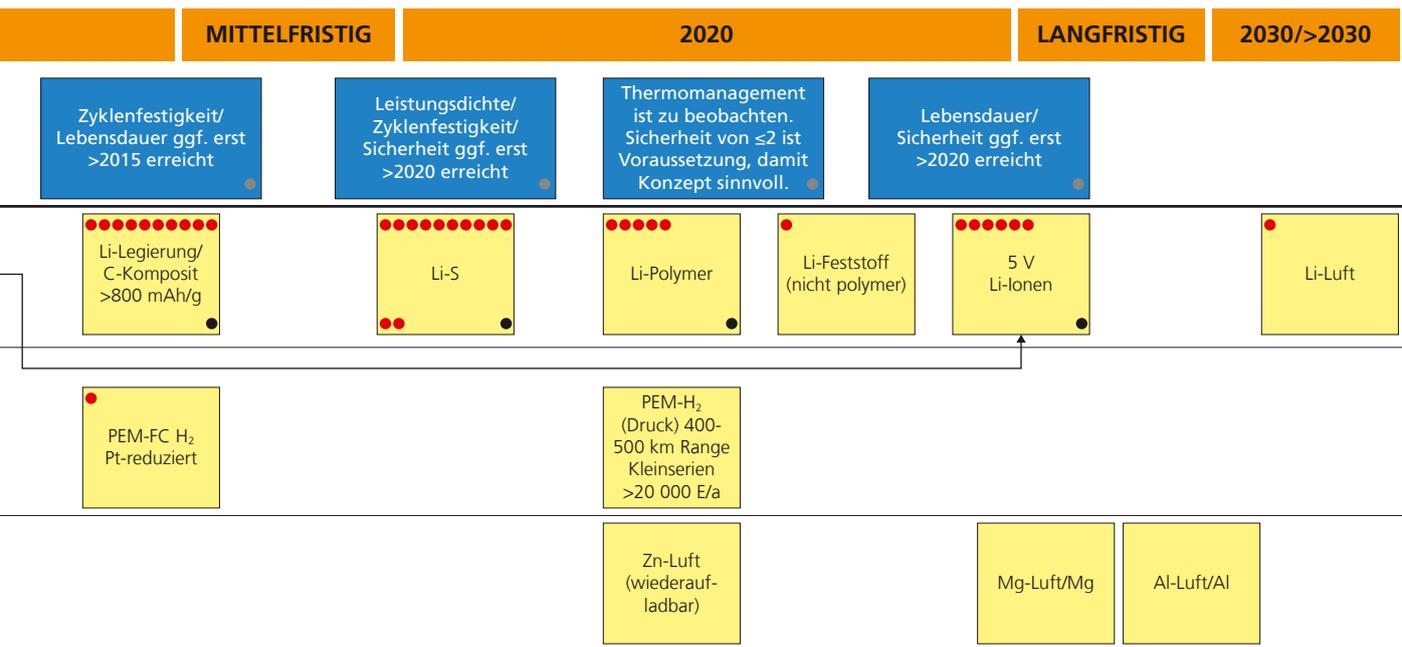
Nicht relevante Energiespeichertechnologien

Hochtemperaturspeicher, wie beispielsweise **Natrium-Nickelchlorid-Batterien** oder **Natrium-Schwefel-Batterien (NaS)**, sind für Anwendungen in der Elektromobilität nicht relevant. Sie wurden deshalb in dieser Technologie-Roadmap nicht vertieft und ausgeklammert.

Supercaps sowie Lithium-basierte Hybrid-Kondensatoren haben die Experten als Energiespeicher mit hoher Leistung diskutiert. Der Fokus in der vorliegenden Technologie-Roadmap liegt hingegen auf hohen erreichbaren Energien. Deshalb wurden solche Systeme nicht weiter betrachtet. Die Experten machen deutlich, dass ein Vergleich zwischen Lithium-Ionen-Batterien (Hochenergiesysteme) und Supercaps (Hochleistungssysteme) wenig hilfreich ist. In der Automobilindustrie kommen Supercaps aus heutiger Sicht nur für Bordnetze bzw. für Mikrosysteme (kleiner als 60 Volt) in Betracht.

Energiespeichertechnologien für stationäre vs. elektromobile Anwendungen

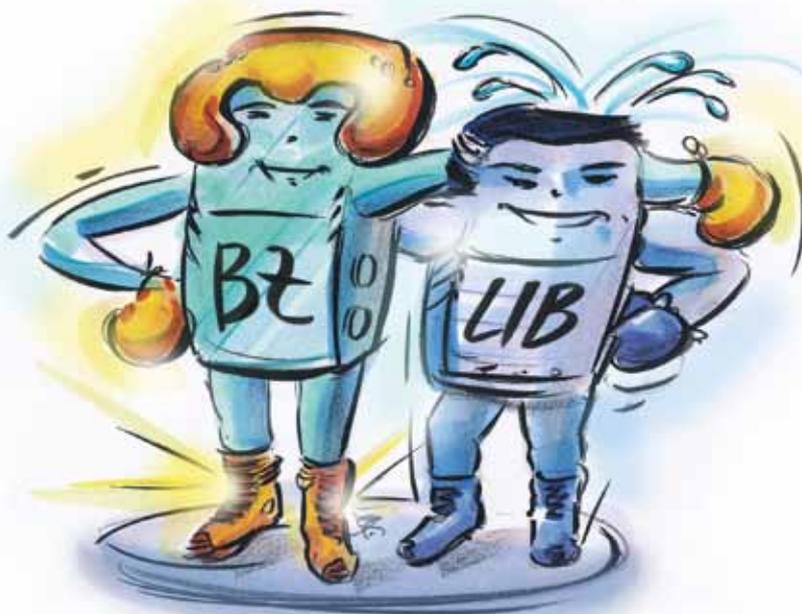
Stationäre Speicher – insbesondere dezentrale stationäre Energiespeicher mit einer starken Anbindung z. B. in die Photovoltaik oder Windkraftanlagen – wurden aus dieser Technologie-Roadmap ausgeblendet. Zu solchen stationären Speichern zählen neben Lithium-basierten Batterien für kleine bis mittelgroße Speichergrößen und -zyklisierungen z. B. Hochtemperaturspeicher wie Natrium-Nickelchlorid-, Natrium-Schwefel-Batterie und Redox-Flow-Speicher. Ferner sind für größere Speicher und Zyklisierungen auch Druckluftspeicher und Wasserkraftspeicher zu betrachten. Die Details zu solchen Speichern sind eigens in der bereits beschriebenen „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“ dokumentiert und sollen bis Ende 2012 veröffentlicht werden. Auch mechanische Speicher sind in der vorliegenden Technologie-Roadmap nicht berücksichtigt.



Zeitraumen
Frage nach Marktreife der Technologien auf Systemebene (nicht im Fahrzeug), Bewertung der Eigenschaften im Vergleich zum Referenzsystem

Referenzsystem
LIB im Automobil; 4 Volt sowie NMC- oder LFP-Kathode und Graphit-Anode, PHEV: 5 kWh; Range Extender: ~10 kWh; BEV: >15 kWh

- Auswahl bestimmter aussichtsreicher Zelltypen durch Teilnehmer
- Im Workshop bewertet
- Schlüsselparameter



„Der Vergleich von Brennstoffzellen- und Batterietechnologie zeigt die Vor- und Nachteile ihres Einsatzes in elektromobilen Anwendungen deutlich auf: Sie sind als Komplementärtechnologien zu sehen.“

Dr. Arnold Lamm, Daimler

„Wesentliche Herausforderungen bei der Entwicklung von Energiespeichern für die Elektromobilität bestehen für Deutschland in den nächsten Jahren hinsichtlich der Verbesserung der Qualität, Lebensdauer und Sicherheit.“

Dr. Hans Jürgen Lindner, Varta Microbattery

FAZIT UND AUSBLICK

FAZIT

Die vorliegende Technologie-Roadmap benennt zentrale Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität mit Fokus auf die in puncto Marktpotenzial vielversprechendsten Fahrzeugkonzepte PHEV und BEV. Ausgehend von der Definition der Brennstoffzelle und Lithium-Ionen-Batterie bildet die Quantifizierung der wesentlichen Leistungsparameter kommender Energiespeichertechnologien die Basis zur Identifikation von entscheidenden Schlüsselparametern. Die wichtigste Rolle spielt in diesem Zusammenhang eine hohe Sicherheit, gefolgt von einer möglichst langen Lebensdauer und großen Leistungsdichte.

Deutlich unterschieden werden können Entwicklungen der dritten Batteriegeneration mit dem Hochvolt-Entwicklungspfad (von 4 V- bis 5 V-Systemen) und der vierten Batteriegeneration (insbesondere der Lithium-Schwefel-Technologie um 2020). Die Lithium-Ionen-Batterien der dritten Batteriegeneration werden in den kommenden zehn Jahren neben bereits verfügbaren Batteriesystemen (zweite Batteriegeneration) für die Einführung und den Markthochlauf der Elektromobilität relevant sein. Post-Lithium-Ionen-Batterien der vierten Batteriegeneration werden jenseits von 2020 zur Anwendung kommen. Neben Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität sollte schon mittelfristig die Brennstoffzelle als Komplementärtechnologie mit betrachtet werden. Insbesondere die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle erreicht schon heute Energiedichten, die mit Lithium-basierten Batterien erst in ferner Zukunft möglich werden sollten.

Im internationalen Kontext lassen sich die Ziele auf nationaler Ebene hinsichtlich der Energiedichte und Kosten bis zum Jahr 2020 gut einsortieren. Die Strategien zur Zielerreichung unterscheiden sich allerdings bei den wichtigsten Akteuren Japan, Südkorea, China und USA im Vergleich zu Deutschland.

AKTUALISIERUNG DER ROADMAP ...

Die Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030 ist ein lebendiges Planungsdokument. Sie wird fortlaufend aktualisiert und weiterentwickelt. Beim Fraunhofer ISI ist eine Projektwebseite eingerichtet, um die Roadmap zu kommentieren und Anregungen für die Weiterentwicklung einfließen zu lassen. Die Roadmap kann unter dem folgenden Link heruntergeladen werden: www.isi.fraunhofer.de/trm-esemroad.php. Für das Jahr 2013 ist geplant, die vorliegende Technologie-Roadmap um eine Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030 zu ergänzen.

... UND NÄCHSTE SCHRITTE DER WEITERENTWICKLUNG

In der anvisierten Produkt-Roadmap werden Aspekte der Marktentwicklung im Vordergrund stehen: Welche Anforderungen werden aus der Sicht vielversprechender Anwendungen wie der PHEV- oder BEV-Fahrzeugkonzepte an die Energiespeicher gestellt? Neben einer Bewertung der Anforderungen an die verschiedenen Eigenschaften soll auch die Marktentwicklung hinsichtlich dieser Anwendungen bis in das Jahr 2030 quantifiziert und verortet werden, soweit tragfähige Daten vorliegen. Daneben sollen u. a. auch politik- und marktbezogene Entwicklungstrends hinsichtlich Regulierung/Gesetzgebung, Normen/Standards, Infrastruktur und Kundenakzeptanz betrachtet und aufbereitet werden.

BENACHBARTE PROJEKTE ZUR ELEKTROMOBILITÄT

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

PROJEKTE

PROJEKT	ARBEITSSCHWERPUNKTE DES FRAUNHOFER ISI	FÖRDERUNG
Roadmapping-Begleitvorhaben zur Innovationsallianz LIB 2015	Roadmapping hinsichtlich der technologie- und marktseitigen Entwicklungsmöglichkeiten für Lithium-Ionen-Batterien (LIB)	BMBF
Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR)	Projekt mit Schwerpunkt Technologie-Monitoring im Rahmen der Fördermaßnahme Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)	BMBF
Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität	Sozio-ökonomische Begleitstudie Forum Elektromobilität e. V.	BMBF
Themenfeld Nutzerakzeptanz	Sozialwissenschaftlich orientierte Vernetzung von Projekten zur Kundenakzeptanzforschung, sowohl hinsichtlich privater als auch gewerblicher Nutzung sowie von integrierten Mobilitätsangeboten mit jeweils der Nutzer- und Betreiber-Seite	BMVBS
intelligent Zero Emission Urban System (iZEUS)	Teilvorhaben „Netzintegration von erneuerbaren Energien und Akzeptanzstudien“ hinsichtlich der Elektromobilität mit Fragestellungen zum richtigen Maß an Netzsteuerung, Automatisierung und Nutzerakzeptanz	BMW i
Flottenversuch Elektromobilität	Systemintegration von Erneuerbaren Energien durch Elektromobilität	BMU
Innovationsreport „Systembetrachtung Elektromobilität“	Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt	TAB
Integrationsprognose für Brennstoffe & Modellierung der Privathaushaltsnachfrage für die Integration von Elektromobilität in Deutschland	Prognose des Endenergiebedarfs für drei Sektoren in Deutschland bis 2035 und Bestimmung der gesamten Elektrizitäts-Lastkurve sowie Analyse der Energienachfrageentwicklung auf Ebene der Haushalte in Deutschland bis 2035 unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität	E.ON AG
Regional Eco Mobility (REM) 2030	Entwicklung eines Konzeptes für und Umsetzung einer effizienten regionalen Individualmobilität für 2030	FhG, Land Baden-Württemberg

GLOSSAR

Ah

Die Amperestunde (Ah) ist eine physikalische Einheit zur Messung von elektrischer Ladung und gibt die Ladung (umgangssprachlich oft Kapazität genannt) 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, es gibt aber noch Probleme bei der Realisierung. Aluminium-Luft-Batterien können mechanisch wieder aufgeladen werden.

Batteriegeneration

Der Begriff geht auf den bereits von vielen Batterieexperten übernommenen Vorschlag des deutschen Konzerns BASF SE zurück, die fortlaufende Batterieentwicklung in sinnvoll voneinander abgegrenzte Perioden einzuteilen wie folgt:

Erste Batteriegeneration

Die erste Batteriegeneration entspricht dem Stand der Technik: Lithium-Kobaltdioxid (LCO) als Kathodenmaterial ergänzt um Graphit als Anodenmaterial und organische Karbonate mit Lithium-Hexafluorophosphat (Summenformel LiPF_6) als Elektrolyt. Batterien der ersten Generation sind heute für den Einsatz in der Konsumelektronik etabliert, sind aus Sicherheitsgründen aber nur bedingt für den Einsatz in Elektrofahrzeugen geeignet.

Zweite Batteriegeneration

Die zweite Batteriegeneration bringt hinsichtlich des Kathodenmaterials neue Schichtstrukturen bzw. Schichtoxide (wie z. B. NMC oder NCA) oder Olivinstrukturen (wie z. B. LFP), Spinellstrukturen (wie z. B. LMO) etc. mit sich. Verbesserte Kohlenstoffbasierte Anodenmaterialien werden auch weiterhin Einzug in die Batterieentwicklung halten, genauso wie Titanat-Anodenmaterialien und Lithium-Legierungen (siehe Li-Legierung/C-Komposit; z. B. mit Aluminium, Silizium und Zinn) sowie Kohlenstoff-Komposite (z. B. mit Silizium). Die Elektrolyte werden weiterhin mit Additiven optimiert werden, das Hexafluorophosphat zuerst reduziert und künftig ggf. gänzlich ersetzt. Daneben werden (Gel-)Polymer-Elektrolyte etc. entwickelt. Die zweite Batteriegeneration grenzt sich gegenüber der ersten Batteriegeneration durch den Ausschluss von LCO-Kathodenmaterial sowie der Entwicklung sichererer Batterien ab. Technologien der zweiten Batteriegeneration werden heute bereits in kommerziell verfügbaren Elektrofahrzeugen eingesetzt.

Dritte Batteriegeneration

Die dritte Batteriegeneration bezieht sich auf die Verbesserung der Zellspannung von Lithium-Ionen-Batterien (siehe Hochenergie-Entwicklung). Damit einher geht der Bedarf von Hochvolt-Elektroden sowie Elektrolytmaterialien für die 5 V-Lithium-Ionen-Batterie. In Bezug auf die Abgrenzung gegenüber der zweiten Batteriegeneration steht die Entwicklung von Hochenergiebatterien (5 V-Batterien) im Fokus. Technologien der dritten Batteriegeneration befinden sich heute in der FuE und werden in den kommenden Jahren als marktreif für den Einsatz in Elektrofahrzeugen erwartet.

Vierte Batteriegeneration

In der vierten Batteriegeneration werden Post-Lithium-Ionen-Batterien entwickelt werden. Li-basierte Systeme wie Li-S oder Li-Luft Batterien sind dabei ebenso eingeschlossen wie weitere Metall-Luft Systeme oder künftige neue Batteriekonzepte mit deutlich erhöhter Energiedichte. Die vierte Batteriegeneration grenzt sich somit durch einen Technologiesprung bzgl. der Energiedichte und somit auch der Reichweite von Elektrofahrzeugen gegenüber Technologien der dritten Batteriegeneration ab.

BEV

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

BMBF

Bundesministerium für Bildung und Forschung. Im Oktober 2012 geleitet von Bundesministerin Dr. Annette Schavan (CDU).

BMU

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Im Oktober 2012 geleitet von Bundesminister Peter Altmaier (CDU).

BMVBS

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Im Oktober 2012 geleitet von Bundesminister Dr. Peter Ramsauer (CSU).

BMWi

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Im Oktober 2012 geleitet von Bundesminister Dr. Philipp Rösler (FDP).

CO₂

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

DOE

Engl. „United States Department of Energy“, das Energieministerium der Vereinigten Staaten von Amerika. Im Oktober 2012 geleitet von Minister Steven Chu.

E.ON

Die E.ON AG zählt zu den größten Energieversorgern Deutschlands. Das Unternehmen mit seinem Hauptsitz in Düsseldorf hat knapp 79 000 Mitarbeiter und einen Umsatz von 113 Milliarden Euro.

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 Tabelle auf Seite 27 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 mehr als 20 000 Mitarbeitern (Stand: Oktober 2012) die größte Organisation für angewandte Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen in Europa und betreibt mehr als 80 Forschungseinrichtungen in Deutschland, davon 60 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.

H₂

Wasserstoff ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol H. Im Universum ist Wasserstoff das häufigste chemische Element, auf der Erde Bestandteil des Wassers und beinahe aller organischen Verbindungen.

HEV

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

Hochenergie-Entwicklung

Mit dem Begriff der Hochenergie-Entwicklung wird ganz konkret auf die Batterietechnologien hingewiesen, die innerhalb der dritten Batteriegeneration in Aussicht stehen. Ausgehend vom Referenzsystem der 4 V-Lithium-Ionen-Batterie sind das die Entwicklungen bis hin zu den 5 V-Systemen.

IAA

Die durch den Verband der Automobilindustrie (VDA) ausgerichtete Internationale Automobil-Ausstellung findet jedes Jahr einmal im Wechsel zwischen Frankfurt am Main (für PKW/Motorräder) und Hannover (für Nutzfahrzeuge) statt.

ICE

Engl. „internal combustion engine“, wird als Abkürzung verwendet, um herkömmliche Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotor für Benzin oder Diesel zu kennzeichnen.

kg

Abkürzung für Kilogramm.

km

Abkürzung für Kilometer.

kWh

Abkürzung für Kilowattstunde (entspricht eintausend Wattstunden, siehe Wh).

Kondensator

Ein Kondensator ist ein Speichermedium, das elektrische Ladungen an den Oberflächen seiner beiden Elektroden speichert. Beim Anlegen eines Stromes wird der Kondensator aufgeladen, beim Umdrehen des Stromes entladen. Weil die Energiedichte sehr gering ist, werden Kondensatoren nicht als ausschließlicher Energiespeicher für die Elektromobilität betrachtet.

I

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.

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.

LIB

Abkürzung für das elektrochemische Energiespeicherkonzept der sogenannten Lithium-Ionen-Batterie, auch im Plural verwendet.

LIB 2015

Die Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“ wurde 2007 gegründet. Sie setzt sich zusammen aus rund 60 Projektpartnern aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, deren gemeinsames Ziel es ist, für Fortschritt in der Forschung und Entwicklung von effizienten Lithium-Ionen-Batterien zu sorgen. In diesem Rahmen verpflichtete sich ein Industriekonsortium, in den nächsten Jahren 360 Millionen Euro für Forschung und Entwicklung zu investieren. Dies wurde ergänzt durch die Fördermittel des BMBF in Höhe von 60 Millionen Euro.

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 (z. B. aus der ersten Batteriegeneration).

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

Im 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-Akkus, in der die Elektroden aus Graphit und Lithium-Metalloxid bestehen. Die Besonderheit besteht im nicht flüssigen Elektrolyten auf Polymerbasis, welcher als feste bis gelartige Folie eingebaut wird.

Li-S

Lithium-Schwefel-Akkumulatoren funktionieren ähnlich wie Natrium-Schwefel-Akkumulatoren (siehe NaS), wobei Lithium das Natrium substituiert. Sie sind jedoch keine Hochtemperaturbatterien. Lithium-Schwefel-Akkumulatoren besitzen eine Anode aus Lithium und eine Kathode aus Schwefel, was eine sehr hohe Energiedichte ermöglicht. Während der Entladung reagiert Lithium von der Anode mit Schwefel, während der Aufladung wird die entstandene Verbindung wieder gelöst.

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

METI

Engl. „Ministry of Economy, Trade and Industry“, das Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie von Japan. Im Oktober 2012 geleitet von Minister Yukio Edano.

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.

MIIT

Engl. „Ministry of Industry and Information Technology“, das Ministerium für Industrie und Informationstechnologie der Volksrepublik China. Im Oktober 2012 geleitet von Minister Miao Wei.

Mikro-Hybrid

Bei Mikro-Hybridfahrzeugen (siehe HEV) wird durch eine Bremskraftrückgewinnung und eine Start-Stopp-Automatik ein kleiner Starter-Akkumulator aufgeladen und so eine Kraftstoffesparung realisiert. Die Energie wird nicht zum Antrieb genutzt.

Mild-Hybrid

In diesem Hybrid-Fahrzeugkonzept (siehe HEV) unterstützt der Elektroantrieb den Verbrennungsmotor zur Leistungssteigerung, wobei Bremsenergie teilweise zurückgewonnen werden kann. Mild-Hybride stellen oft parallele Hybridantriebe dar.

MKE

Engl. „Ministry of Knowledge Economy“, das Ministerium für Wissensökonomie der Republik Korea. Im Oktober 2012 geleitet von Minister Choi Kyung Hwan.

MOST

Engl. „Ministry of Science and Technology“, das Ministerium für Wissenschaft und Technologie der Volksrepublik China. Im Oktober 2012 geleitet von Minister Wan Gang.

MWh

Abkürzung für die physikalische Einheit der Megawattstunden. Eine Megawattstunde entspricht einer Million Wattstunden (siehe Wh).

Nafion®

Nafion ist ein Tetrafluorethylen-Polymer mit protonenleitenden Sulfonatgruppen, welches als Teflon-Modifikation die ganz neue Gruppe der Ionomere begründete und ein eingetragenes Warenzeichen der Firma DuPont (einer der weltweit größten Konzerne in der chemischen Industrie aus den Vereinigten Staaten von Amerika) ist. Nafion findet eine technische Anwendungsmöglichkeit als Membran in Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (siehe PEM-FC).

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.

Natrium-Nickelchlorid

Eine Natrium-Nickelchlorid-Zelle (auch als ZEBRA-Batterie bezeichnet) ist ein wieder aufladbarer 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 gesintertem Nickel mit Nickelchlorid durchtränkt mit einer flüssigen Salzlösung aus Natriumaluminiumchlorid. Die Notwendigkeit zur Aufrechterhaltung der hohen Betriebstemperatur erzwingt den Einsatz einer Heizung zusätzlich zur thermischen Isolation.

NCA

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

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.

Ni/MH

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

Ni/Zn

Nickel-Zink-Batterien sind wieder aufladbar. Mit einer Kathode aus Nickel und einer Anode aus Zink weist die Technologie eine relativ hohe Energiedichte auf.

NMC

Engl. „lithium nickel manganese cobalt oxide“, 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.

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

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

Peak-Dauer

Mit diesem technischen Begriff kann festgehalten werden, wie lange es einem Batteriesystem möglich ist, seine höchste Leistung abzuliefern (engl. „peak“ entspricht der „Höchstbelastung“ bzw. „Höchstleistung“).

PEM-FC

Engl. „proton exchange membrane fuel cell“, die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle.

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 Elektroauto dar.

PKW

Abkürzung für Personenkraftwagen.

Post-LIB

Abkürzung für Post-Lithium-Ionen-Batterien, wird unter deutschsprachigen Batterieexperten oft synonym zu Technologien der vierten Batteriegeneration verwendet.

Produkt-Roadmap

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

Pt

Platin ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Pt.

Range Extender

Steht für Aggregate zur Reichweitenverlängerung von Elektrofahrzeugen. Am häufigsten eingesetzt werden Verbrennungsmotoren, welche einen Generator antreiben, der wiederum Akkumulator und Elektromotor mit Strom versorgt (siehe REEV).

REEV

Engl. „range-extended electric vehicles“, steht für ein Elektrofahrzeug mit Range-Extender-Lösung. Die Fahrzeuge sind so ausgelegt, dass sie größtenteils auf Basis der Batterieleistung betrieben werden können. Sie weisen aber einen Benzin- oder Dieselgenerator als zusätzliche Ausstattung auf, um die Batterie aufzuladen, wenn sich ihre Ladung dem Ende zuneigt.

RFB

Steht für Redox-Flow-Batterie, ein Akkumulatoren-Konzept, welches auf der Reduktion und Oxidation von umgepumpten Elektrolytlösungen aus Vorratstanks an einem brennstoffzellenartigen 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 Tech-

nologie-Roadmap. Allen Roadmaps ist gemein, dass durch ihre Erstellung Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Schritten und damit Risiken und Unsicherheiten aufgedeckt werden können.

Supercaps

Engl. „supercaps“, die kurze Version von „supercapacitors“, elektrochemische Doppelschichtkondensatoren verwenden batterieähnliche Elektroden aus Aktivkohle mit hoher Oberfläche, die in einen Elektrolyten tauchen (siehe Kondensator). Charakteristisch sind sehr hohe Leistungsdichten, nachteilig die geringen Energiedichten.

T

Abkürzung für Temperatur.

TAB

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

Technologie-Roadmap

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

V

Abkürzung für Volt.

Vanadium-Redox-Flow-Batterie

Diese Batterietechnologie ist eine Variante der Redox-Flow-Batterie (siehe RFB). Das Verfahren der Vanadium-Redox-Flow-Batterie nutzt jedoch Vanadium-Ionen in verschiedenen Oxidationszuständen, um chemische Energie in Form von gelösten Redox-Paaren in verschiedenen Tanks zu speichern. Die Stromwandlung erfolgt in einem getrennten Leistungsmodul, 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.

Voll-Hybrid

Diese Variante der Hybrid-Fahrzeuge (siehe HEV) kann aufgrund des leistungsstarken Elektromotors allein durch seine Nutzung anfahren, fahren und beschleunigen. Sie stellen die Grundlage für serielle Hybride dar.

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.

EUCAR Gefährdungsstufen und Beschreibungen – EUCAR Hazard Levels and Descriptions²⁶

Hazard Level	Description	Classification Criteria & Effect
0	No effect	No effect. No loss of functionality.
1	Passive protection activated	No defect; no leakage; no venting, fire, or flame; no rupture; no explosion; no exothermic reaction or thermal runaway. Cell reversibly damaged. Repair of protection device needed.
2	Defect/Damage	No leakage; no venting, fire, or flame; no rupture; no explosion; no exothermic reaction or thermal runaway. Cell irreversibly damaged. Repair needed.
3	Leakage $\Delta\text{mass} < 50\%$	No venting, fire, or flame*; no rupture; no explosion. Weight loss $< 50\%$ of electrolyte weight (electrolyte = solvent + salt).
4	Venting $\Delta\text{mass} \geq 50\%$	No fire or flame*; no rupture; no explosion. Weight loss $\geq 50\%$ of electrolyte weight (electrolyte = solvent + salt).
5	Fire or Flame	No rupture; no explosion (<i>i.e.</i> , no flying parts).
6	Rupture	No explosion, but flying parts of the active mass.
7	Explosion	Explosion (<i>i.e.</i> , disintegration of the cell).

* The presence of flame requires the presence of an ignition source in combination with fuel and oxidizer in concentrations that will support combustion. A fire or flame will not be observed if any of these elements are absent. For this reason, we recommend that a spark source be used during tests that are likely to result in venting of cell(s). We believe that “credible abuse environments” would likely include a spark source. Thus, if a spark source were added to the test configuration and the gas or liquid expelled from the cell was flammable, the test article would quickly progress from level 3 or level 4 to level 5.

W

Bei Watt (W) handelt es sich um die physikalische Einheit, welche Energie pro Zeit angibt und somit zur Beschreibung eines Energieverbrauches genutzt werden kann (siehe Wh).

Well-to-Wheel-Analyse

Unter diesem Begriff (wörtlich auf deutsch „vom Bohrloch bis zum Rad“) wird eine Lebenszyklusanalyse von Fahrzeugantrieben verstanden. Dabei wird ein ganzheitlicher Betrachtungsansatz zugrunde gelegt, bei dem Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen auf der Basis eines integrierten Ansatzes bewertet werden, die sowohl die Vorkette der Kraftstoffbereitstellung („Well-to-Tank“) als auch die Nutzung im Fahrzeug („Tank-to-Wheel“) beinhaltet. Weiterhin werden die Gesamtkosten betrachtet. Die Methode ermöglicht es, vergleichbare Gesamtwirkungsgrade zu berechnen.

Wh

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

Zn-Luft

Die Zink-Luft-Batterie gibt es im Moment nur als Primärzelle, das heißt, 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.

QUELLEN

¹ Nationale Plattform Elektromobilität (NPE, 2012): Dritter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin – Seite 14ff.

² NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW, 2012): Förderprogramme – Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP). Online-Ressource, Link: <http://www.now-gmbh.de/de/ueber-die-now/foerderprogramme/nationalesinnovationsprogramm-nip.html>, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

³ Verband der Automobilindustrie (VDA, 2012): Zahlen & Fakten – Allgemeines. Online-Ressource, Link: <http://www.vda.de/de/zahlen/jahreszahlen/allgemeines/>, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

⁴ Verband der Automobilindustrie (VDA, 2012): Termine & Aktionen – Fakten zur deutschen Automobilindustrie. Online-Ressource, Link: http://www.vda.de/de/veranstaltungen/nachwuchsfoerderung/going/fakten_automobilindustrie.html, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

⁵ Nationale Plattform Elektromobilität (NPE, 2011): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin – Seite 6.

⁶ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (ISI, 2010): Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Online-Ressource, Link: <http://www.isi.fraunhofer.de/trm-libroad.php>, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

⁷ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (ISI, 2012): Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Online-Ressource, Link: <http://www.isi.fraunhofer.de/prm-libroad.php>, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

⁸ Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD), International Energy Agency (IEA) (OECD/IEA, 2009): IEA Technology Roadmap – Electric and plug-in hybrid electric vehicles. Online-Ressource, Link: http://www.oecd-ilibrary.org/energy/technology-roadmap-electric-and-plug-in-hybrid-electric-vehicles_9789264088177-en, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

⁹ Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD), International Energy Agency (IEA) (OECD/IEA, 2011): IEA Technology Roadmap – Electric and plug-in hybrid electric

vehicles (Updated June 2011). Online-Ressource, Link: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EV_PHEV_Roadmap.pdf, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

¹⁰ New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO, 2010): Battery Roadmap 2010. Online-Ressource, Link: <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100519a05j.pdf> (über das Ministry of Economy, Trade and Industry, METI), zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

¹¹ Ministry of Knowledge Economy (MKE, 2010): 8th Report of the Presidential Committee on Green Growth – integrierte Roadmap. Aus der intern vorliegenden Übersetzung der Original-Edition.

¹² Ministry of Industry and Information Technology (MIIT, 2012): Entwicklungsplan für energieeffiziente und auf neuen Energieträgern basierende Fahrzeuge (2012-2020). Aus der intern vorliegenden Übersetzung der Original-Edition.

¹³ Ministry of Science and Technology (MoST, 2010): 863 key technology and system integration project for EVs. Aus der intern vorliegenden Übersetzung der Original-Edition.

¹⁴ U.S. Department of Energy (DOE, 2011): Outlook for Battery Cost and EV Production Capacity. Online-Ressource, Link: (http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2011/electrochemical_storage/es000_howell_2011_o.pdf) (über das U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy, Vehicle Technologies Program), zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

¹⁵ Nationale Plattform Elektromobilität (NPE, 2011): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität Anhang. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin – Seite 27.

¹⁶ Peters et al. (2012): Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Innovationsreport im Auftrag des Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Karlsruhe (in Vorbereitung).

¹⁷ Pehnt (2002): Energierevolution Brennstoffzelle? Perspektiven, Fakten, Anwendungen. Wiley-VCH Verlag gmbh & Co. kga, Weinheim – Seite 51.

¹⁸ U.S. Department of Energy (DOE, 2006): Fuel Cell Handbook (Seventh Edition). Online-Ressource, Link: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/pubs/FCHandbook7.pdf>, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

¹⁹ Kaiser et al. (2008): Zukunft des Autos. Studie erstellt durch die Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH im Auftrag des VDI e. V., Link: http://www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/Band_75.pdf, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

²⁰ Wietschel et al. (2010): Energiespeichertechnologien 2050. Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung (Technologienbericht). Fraunhofer ISI, Karlsruhe – Seite 278.

²¹ NOW GmbH et al. (2011) Ein Portfolio von Antriebssystemen für Europa: Eine faktenbasierte Analyse - Die Rolle von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, Plug-in Hybridfahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen. Online-Ressource, Link: http://www.now-gmbh.de/uploads/media/9__Studie_Portfolio_von_Antriebssystemen.pdf, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

²² Wietschel et al. (2010): Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger (Endbericht). Fraunhofer ISI, Karlsruhe – Seite 50.

²³ Michaelis et al. (2012): Vergleich alternativer Antriebstechnologien Batterie-, Plug-in Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeug. In Tagungsband „Alternative Antriebe bei sich wandelnden Mobilitätsstilen“, Karlsruhe (in Vorbereitung).

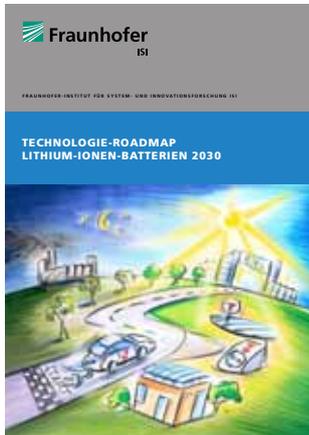
²⁴ ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2011): UMBReLA – Umweltbilanzen Elektromobilität. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Link: <http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/begleitforschung/dokumente-downloads/GrundlagenberichtUMBRelaI-FEUfinal.pdf>, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

²⁵ Bünger et al. (2011): Well-to-Wheel Analyse von Elektrofahrzeugen. Studie für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) im Rahmen des Innovationsreports „Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt“. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Ottobrunn (München) – Seite 4

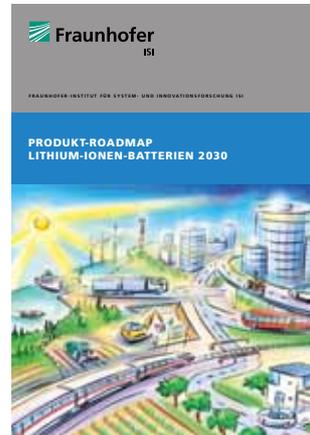
²⁶ Sandia National Laboratories (SAND, 2006): FreedomCAR–Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications. Online-Ressource, Link: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2005/053123.pdf>, zuletzt abgerufen am 11. Oktober 2012.

TECHNOLOGIE-ROADMAPPING AM FRAUNHOFER ISI: KONZEPTE – METHODEN – PRAXISBEISPIELE

Bereits in der Schriftenreihe erschienen:
LIB 2015-Roadmaps



Juni 2010
Technologie-Roadmap
Lithium-Ionen-Batterien 2030



Februar 2012
Produkt-Roadmap
Lithium-Ionen-Batterien 2030

Weitere Veröffentlichungen



August 2010
Wind-Tunnel Technology
Roadmap and Analysis of the
Innovation within the field



Januar 2012
Roadmap zur Kunden-
akzeptanz
(Kundenakzeptanz und
-anforderungsprofil)

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
Projektbetreuung: Ingo Höllein

Projektträger

Projektträger Jülich
Geschäftsbereich Neue Materialien und Chemie, NMT
52425 Jülich
www.fz-juelich.de
Projektbetreuung: Dr. Andreas Volz

Autoren

(Alle im Folgenden genannten Personen sind zum Zeitpunkt
der Erstellung und Veröffentlichung der vorliegenden Bro-
schüre am Fraunhofer ISI angestellt.)

Dr. Axel Thielmann
Telefon +49 721 6809-299, Fax +49 721 6809-315
axel.thielmann@isi.fraunhofer.de

Andreas Sauer
Telefon +49 721 6809-458, Fax +49 721 6809-315
andreas.sauer@isi.fraunhofer.de

Prof. Dr. Ralf Isenmann
Telefon +49 721 6809-393, Fax +49 721 6809-330
ralf.isenmann@isi.fraunhofer.de

Prof. Dr. Martin Wietschel
Telefon +49 721 6809-254, Fax +49 721 6809-272
martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Schriftenreihe des Fraunhofer ISI

ISSN 2192-3981
e-ISSN 2192-3973
Nr. 5 | 1. Auflage
Oktober 2012
Technologie-Roadmap Energiespeicher
für die Elektromobilität 2030
1. Auflage: 2000 Stück

Gestaltung

MarketingConsulting Liljana Groh, Karlsruhe

Illustrationen

Heyko Stöber, Hohenstein

Druck

E&B engelhardt und bauer Druck
und Verlag GmbH, Karlsruhe

Bestellung

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 2012

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 breiten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Forschungsansatz.

Das Fraunhofer ISI prägt seit seiner Gründung im Jahr 1972 die deutsche und internationale Innovationslandschaft. Heute beschäftigt das Fraunhofer ISI mehr als 220 Mitarbeiter, darunter rund 150 Wissenschaftler aus den Natur-, Ingenieur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, die pro Jahr an etwa 350 Forschungsprojekten arbeiten. Das jährliche Budget, 21 Millionen Euro im Jahr 2011, wird vornehmlich durch Aufträge der nationalen und internationalen öffentlichen Hand, aus der Wirtschaft sowie von Stiftungen und Wissenschaftsorganisationen eingenommen.

ISSN 2192-3981

