



Fraunhofer

ISI

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI

ENERGIESPEICHER-ROADMAP (UPDATE 2017) HOCHENERGIE-BATTERIEN 2030+ UND PERSPEKTIVEN ZUKÜNFTIGER BATTERIETECHNOLOGIEN



ENERGIESPEICHER-ROADMAP (UPDATE 2017)

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	2
EXECUTIVE SUMMARY	3
EINLEITUNG UND MOTIVATION	
Treiber und Rahmenbedingungen für die Batterieentwicklung	4
Kommerzialisierung der Batterietechnologien	6
Batterie-Nachfrage und Produktion bis 2030+	8
Roadmapping-Methodik	12
ROADMAP HOCHENERGIE-BATTERIEN 2030+	
Anforderungen an Leistungsparameter künftiger Hochenergie-Batterien (bis Zelle)	14
Anforderungen an Leistungsparameter künftiger Hochenergie-Batterien (Modul/System)	18
Roadmap Erklärung	20
FuE-Herausforderungen für die Hochenergie-Batterieentwicklung	24
Steckbriefe Hochenergie-Batterien	28
PERSPEKTIVEN ZUKÜNFTIGER BATTERIETECHNOLOGIEN	
Warum ist FuE an Technologiealternativen wichtig?	80
Langfristperspektiven alternativer Batterietechnologien	82
FuE-Herausforderungen für die Entwicklung zukünftiger Batterien	88
Steckbriefe Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien	90
FAZIT UND AUSBLICK	112
QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS	114
PUBLIKATIONSÜBERSICHT	118
IMPRESSUM	120

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

3C	Consumer, Computer, Communication bzw. tragbare Geräte	LMFP	Lithium-Mangan-Eisenphosphat
AESC	Automotive Energy Supply Corporation	LMO	Lithium-Manganoxid
B2B	Business-to-Business	LNO	Lithium-Nickeloxid
B2C	Business-to-Consumer	LTO	Lithium-Titanoxid bzw. Lithium-Titanat
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (engl. battery electric vehicle)	Me	Metall
BJB	Battery Junction Box	Mg-S	Magnesium-Schwefel-Batterie
BMS	Batteriemanagementsystem	Na-IB	Natrium-Ionen-Batterie
BYD	Build Your Dreams (Automobil- und Zellhersteller, CN)	NaNiCl	Natrium-Nickelchlorid- bzw. Zebra-Batterie
CALB	China Aviation Lithium Battery Co., Limited (Zellhersteller, CN)	Na-S	Natrium-Schwefel-Batterie
CATL	Contemporary Amperex Technology Co. Limited (Zellhersteller, CN)	NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid
CN	China	NEC	NEC Energy Devices, Limited (Zellhersteller, JP)
CNT	Carbonnanotube	NiCd	Nickel-Cadmium-Batterie
CPE	Composite Polymer Electrolyte	NiMH	Nickel-Metallhydrid-Batterie
C-Rate	Lade- (oder Entladestrom) eines Akkus bezogen auf seine Kapazität	NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid
DC	Gleichstrom (engl. direct current)	NTC	Negative Temperature Coefficient Thermistor
DE	Deutschland	OEM	Originalausrüstungshersteller (engl. Original Equipment Manufacturer)
DOD	Depth of Discharge	Pb-Batterien	Blei-Batterie
EIS	Elektrochemische Impedanzspektroskopie	PbC	Blei-Carbon-Batterie
ESS	stationäre Energiespeichersysteme	PHEV	Plug-in hybridelektrisches Fahrzeug (engl. plug-in hybrid electric vehicle)
EU	Europa, Europäische Union	PSOC	Partial State of Charge
EV	Elektromobilität (alle Anwendungen, Konzepte, in welchen Batterien zur Traktion verwendet werden)	PtL	Power to Liquid
FuE	Forschung und Entwicklung	RBW	Red Brick Walls
GWh	Gigawattstunde	RFB	Redox-Flow-Batterie
HE-	Hochenergie-	SCE	Solid Composite Electrolyte
HEV	Hybridelektrisches Fahrzeug (engl. hybrid electric vehicle)	SEI	Solid Electrolyte Interface
JP	Japan	Si/C	Silicium-Kohlenstoff-Komposite
KR	Südkorea	SKI	SK Innovation (Zellhersteller, KR)
LCOE	Levelized Cost Of Electricity	SOC	State of Charge
LFP	Lithium-Eisenphosphat	SOH	State of Health
LIB	Lithium-Ionen-Batterie	SPE	Solid Polymer Electrolyte
Li-O ₂ /Luft	Lithium-Sauerstoff/Luft-Batterie	SW	Schweden
LiPF ₆	Lithiumhexafluorophosphat	TRL	Technology Readiness Level
		TWh	Terawattstunde
		US	USA, Vereinigte Staaten von Amerika
		USP	Unique Selling Point
		USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
		V/V	Vanadium/Vanadium Redox-Flow-Batterien
		xEV	BEV, PHEV und HEV
		Zn/Br	Zink/Brom Redox-Flow-Batterien

EXECUTIVE SUMMARY

Im kommenden Jahrzehnt wird die Nachfrage nach Batterien drastisch zunehmen, wenn sich Elektrofahrzeuge, tragbare digitale Elektrogeräte sowie stationäre dezentrale Energiespeicher weiter durchsetzen. Allein Europa könnte mit einem Anteil von 20 bis 30 Prozent der globalen Nachfrage dazu beitragen, dass Zellproduktionskapazitäten von mindestens 200 GWh bis in den TWh-Bereich bis etwa 2030 an europäischen Standorten aufgebaut werden müssen. Die derzeit für Europa angekündigten Kapazitäten asiatischer und europäischer Zellhersteller können diese Nachfrage nicht bedienen. Mit Blick auf die internationalen Lieferketten, von den Rohstoffen bis zum Recycling und der Wiederverwertung, müssen sich die Batterieindustrie und davon abhängige Systemintegratoren dringend auf diese Entwicklungen vorbereiten.

Wie derartige Entwicklungen oder konkrete zu lösende Herausforderungen für die Technologieentwicklung von Lithium-Ionen- bzw. lithiumbasierten Batterien der kommenden 10 bis 15 Jahre aussehen könnten, benennt die normative Roadmap Hochenergie-Batterien 2030+. Dabei wird aufgezeigt, wie ein sukzessiver Wechsel aller Zellkomponenten bis hin zu Feststoffbatterien erfolgen kann, um die Anforderungen an höhere Energiedichten zu erfüllen und insgesamt den Energiedurchsatz im Batteriesystem zu verbessern. Dabei muss eine Optimierung durch das Zusammenspiel der Zellmaterialien und -komponenten erfolgen und zudem die Entwicklungen bis auf Zell- und Systemebene sowie die Anwendungsintegration mit einbezogen werden.

Mit nickelreichen und Hochenergie-NMC-Kathoden sowie mit auf Si/C-Kompositen basierenden Hochkapazitätsanoden mit bis zu 20 Prozent Si-Anteil dürften bis 2030+ optimierte Lithium-Ionen-Batteriezellen mit 300–350 Wh/kg gravimetrischer und etwa 1000 Wh/l volumetrischer Energiedichte erreichbar sein. Die Zellkosten dürften dann im Bereich von 70–100 €/kWh liegen. Dabei werden sich die Leistungsparameter der Zellformate zylindrisch, prismatisch und Pouch auf Modulebene zunehmend angleichen. Feststoffbatterien mit Li-Metall-Anoden können langfristig mit noch höheren Energiedichten auf den Markt kommen.

Die Entwicklungen sind aber mit Risiken behaftet und erfordern Forschungsanstrengungen zu geeigneten Elektrolytmaterialien, neuen Materialdesigns und Produktionstechnologien. Bei Elektrofahrzeug-Anwendungen stehen hybride und keramische Feststoffbatterien im Fokus und könnten ab 2030 Marktreife erlangen.

Allerdings sind mit der Entwicklung von Hochenergie-Batterien auch Risiken verbunden wie z. B. die Gefahr einseitiger technologischer Abhängigkeiten. Bereits heute versuchen sich einige Hersteller den Zugang zu zentralen Batterierohstoffen wie Kobalt und Lithium für die kommenden Jahre zu sichern. Langfristig werden Aspekte der Ressourcenverfügbarkeit und Nachhaltigkeit immer mehr an Bedeutung gewinnen und sich die Frage nach der Rohstoffsubstitution und Verfügbarkeit alternativer Technologien stellen.

Eine explorative Roadmap hebt durch das Aufzeigen von Langfristperspektiven zukünftiger Batterietechnologien in der Regel an disruptive Lösungsansätze geknüpfte Entwicklungsrichtungen für alternative Batterietechnologien hervor. In der Praxis noch ungelöste Herausforderungen betreffen oftmals z. B. fehlende geeignete Elektrolyte, welche die Entwicklung neuer Elektrodematerialien und auch das Elektrodendesign begrenzen. Zudem sind Fragen einer künftigen produktionstechnischen Umsetzung in der Regel noch völlig offen.

Forschungsaktivitäten im Bereich alternativer Batterietechnologien sind jedoch wichtig, denn neben möglichen technischen Fortschritten ist auch eine Anpassung oder Neubewertung der Anforderungen an Energiespeichertechnologien mit einem stärkeren Fokus auf Nachhaltigkeitsaspekte zukünftig nicht auszuschließen. Auch bei schlechteren Leistungsparametern könnten solche Lösungen z. B. mit Blick auf Ressourcenverfügbarkeit und Kosten zukünftig Alternativen darstellen.

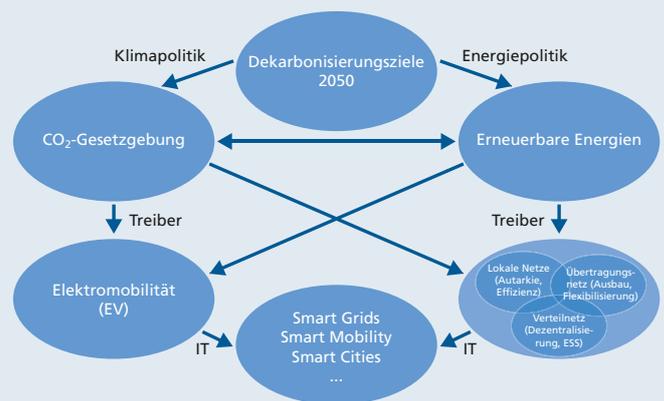
Mit der Energiespeicher-Roadmap 2017 soll die Entwicklung einer langfristigen Forschungsstrategie für den Standort Deutschland unterstützt werden.

EINLEITUNG UND MOTIVATION

TREIBER UND RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DIE BATTERIEENTWICKLUNG

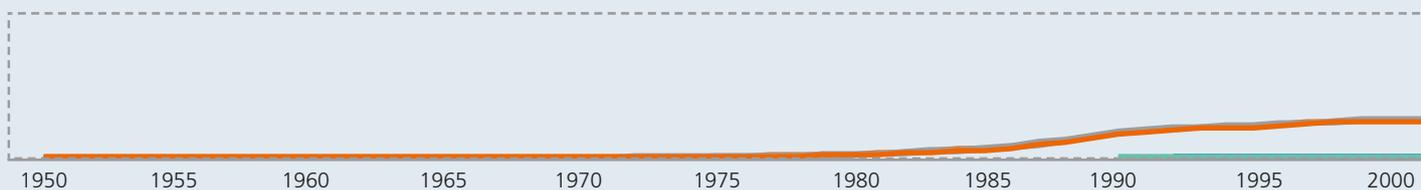
Die Dekarbonisierung stellt ein zentrales Mittel der Energie- und Klimapolitik für die Energiewende und den Klimaschutz dar. Der Ausbau der erneuerbaren Energien und die CO₂-Gesetzgebung sind dabei wesentliche Treiber¹, um die Vision einer emissionsarmen bzw. -freien und damit nachhaltigen Mobilität zu erreichen. Zwar betreffen die Dekarbonisierungsziele alle Sektoren wie Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude/Haushalte und Verkehr. Der Verkehrssektor trägt jedoch europaweit mit etwa 25 Prozent zu den Treibhausgasemissionen bei und verzeichnet als einziger Sektor in den letzten Jahren durch den zunehmenden Bedarf nach Mobilität wieder steigende Emissionen.^{2,3} Der Bedarf nach nachhaltigen Mobilitätskonzepten und entsprechenden technischen Lösungen ist und bleibt daher besonders dringlich. Neben CO₂-Grenzwerten wurde insbesondere in 2017 intensiv über die Einführung von Elektroauto-Quoten und ein mögliches Verbot von Verbrennungsmotoren diskutiert: in Deutschland, EU-weit ebenso wie in weiteren Weltregionen. Ziel ist es die Einführung und Diffusion der Elektromobilität voranzutreiben.

Batterien, insbesondere optimierte Lithium-Ionen-Batterien, stellen eine Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität dar, denn weitere alternative Technologien zur Ablösung der fossilen Ära im Transportsektor sind praktisch nicht in Sichtweite. Ihre zukünftige Weiterentwicklung wird jedoch entscheidend für die zeitliche Umsetzung und Diffusion der Elektromobilität sein. Die Entwicklung der Batterietechnologie, die Marktdiffusion von Elektroautos ebenso wie der Ausbau erneuerbarer Energien müssen dabei Hand in Hand erfolgen. So zieht der Ausbau erneuerbarer Energien wie der PV und Windkraft zugleich einen Bedarf nach dezentraler Energiespeicherung nach sich. Sowohl intelligente Netze der Zukunft (Smart Grids) als auch eine intelligente Elektromobilität (Smart Mobility) erfordern eine effiziente und autonome Anbindung und Steuerung dezentraler Speichertechnologien an



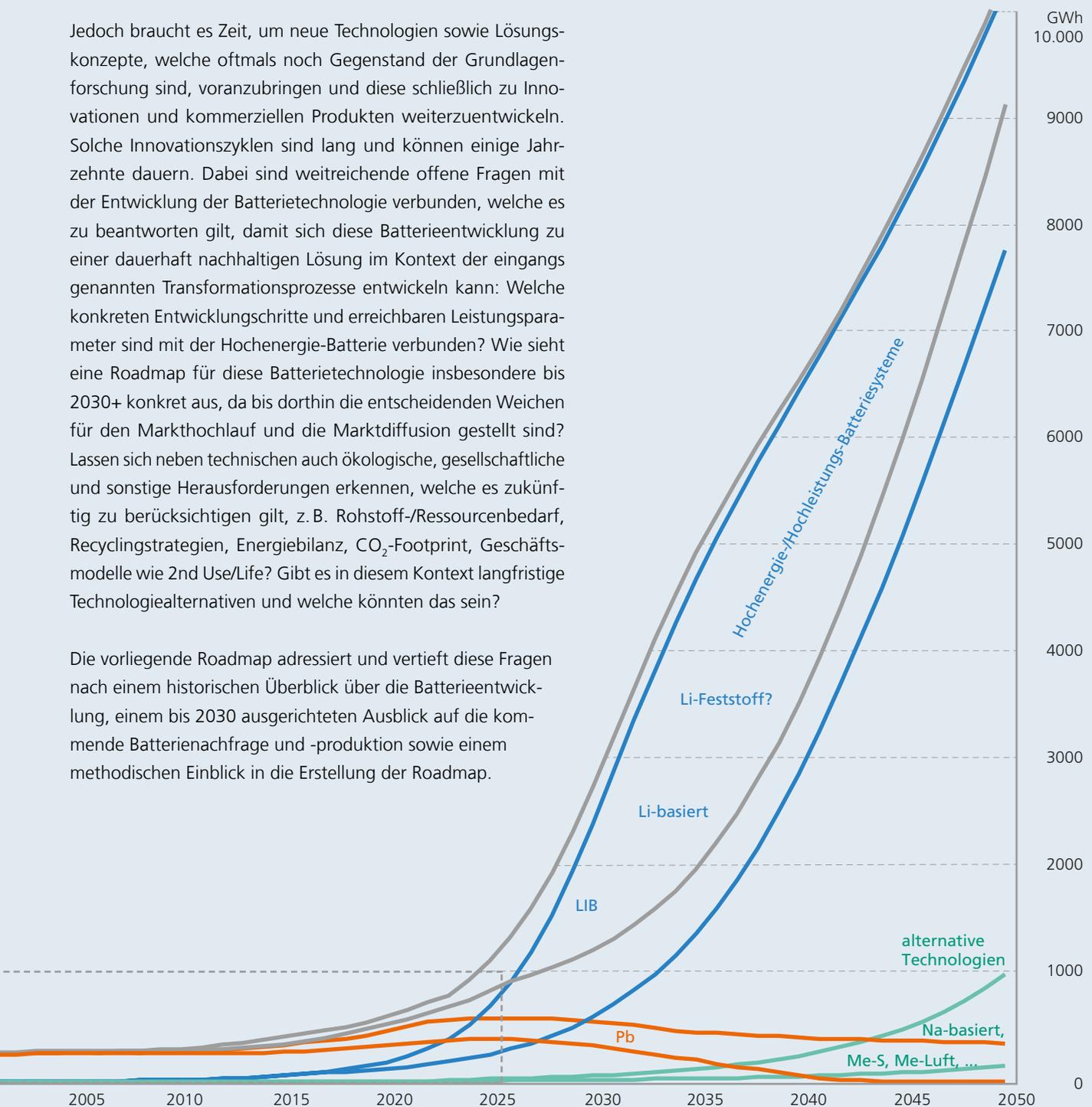
das Energienetz. Die Definition von elektromobiler und stationärer Energiespeicherung wird daher vor den globalen Trends der Autonomisierung (und Autarkie) sowie Dezentralisierung (und Individualisierung) mittel- bis langfristig verschwimmen.

Die historische Entwicklung der globalen Batterienachfrage seit 1950 bis heute sowie die Zukunftsszenarien bis 2050 zeigen 100 Jahre der Kommerzialisierung von Batterien auf.⁴ Die aktuelle Batterienachfrage im Bereich von fast 500 GWh gegenüber einer Nachfrage im Bereich mehrerer TWh auf Basis der geschilderten Treiber fortschreitenden Marktdiffusion verdeutlicht, dass wir uns heute noch immer am Anfang eines weitreichenden Transformationsprozesses befinden. Die dominierende Nachfrage nach Batterien wird dabei zukünftig durch die Entwicklung der Elektrofahrzeuge bestimmt sein, welche hohe Anforderungen z. B. an die Reichweite, Schnellladefähigkeit und Kosten stellen. Entsprechend besteht die Nachfrage künftig Hochenergie-/Hochleistungs-Batteriesysteme zu entwickeln, welche zudem durch Skaleneffekte, ausgereifte Produktionsprozesse etc. eine Kostensenkung ermöglichen. Und dies immer weiter bis an die Grenzen, welche letztlich durch die Material- und Rohstoffkosten definiert sind.



Jedoch braucht es Zeit, um neue Technologien sowie Lösungskonzepte, welche oftmals noch Gegenstand der Grundlagenforschung sind, voranzubringen und diese schließlich zu Innovationen und kommerziellen Produkten weiterzuentwickeln. Solche Innovationszyklen sind lang und können einige Jahrzehnte dauern. Dabei sind weitreichende offene Fragen mit der Entwicklung der Batterietechnologie verbunden, welche es zu beantworten gilt, damit sich diese Batterieentwicklung zu einer dauerhaft nachhaltigen Lösung im Kontext der eingangs genannten Transformationsprozesse entwickeln kann: Welche konkreten Entwicklungsschritte und erreichbaren Leistungsparameter sind mit der Hochenergie-Batterie verbunden? Wie sieht eine Roadmap für diese Batterietechnologie insbesondere bis 2030+ konkret aus, da bis dorthin die entscheidenden Weichen für den Markthochlauf und die Marktdiffusion gestellt sind? Lassen sich neben technischen auch ökologische, gesellschaftliche und sonstige Herausforderungen erkennen, welche es zukünftig zu berücksichtigen gilt, z. B. Rohstoff-/Ressourcenbedarf, Recyclingstrategien, Energiebilanz, CO₂-Footprint, Geschäftsmodelle wie 2nd Use/Life? Gibt es in diesem Kontext langfristige Technologiealternativen und welche könnten das sein?

Die vorliegende Roadmap adressiert und vertieft diese Fragen nach einem historischen Überblick über die Batterieentwicklung, einem bis 2030 ausgerichteten Ausblick auf die kommende Batterienachfrage und -produktion sowie einem methodischen Einblick in die Erstellung der Roadmap.



KOMMERZIALISIERUNG DER BATTERIETECHNOLOGIEN

Obwohl die Geschichte der Batterieentwicklung bis ins 18. Jahrhundert zurückreicht (Galvani, Volta) und im 19. Jahrhundert zu einer immer größeren Bedeutung der Erforschung der Elektrizität in der Chemie geführt hat, haben Batterien erst Mitte des 20. Jahrhunderts in Hinblick auf eine Serien- bzw. Massenproduktion und damit Nachfrage und Anwendungsdiffusion ihre breitere Kommerzialisierung erfahren.

So hat die NiCd-Batterie in den 1950er-Jahren Serienreife erlangt und wurde bis um die Jahrtausendwende insbesondere in Power-Tool-Anwendungen eingesetzt, mit einer Nachfrage von wenigen GWh (siehe Abbildung: Die linke Achse gilt für NiCd und NiMH, die rechte Achse für alle anderen Batterietechnologien). Bleibatterien haben zwischen Ende der 1960er bis in die 1990er-Jahre ihre Verbreitung in Starterbatterien und schließlich industriellen (z. B. Gabelstapler) und stationären Anwendungen (z. B. unterbrechungsfreie Stromversorgung USV, Telekom-Anwendungen etc.) gefunden und stellen heute noch die Batterietechnologie mit der größten Nachfrage dar (350–400 GWh).

Mit der Einführung der NiMH-Batterien 1989 und besonders der Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in 1991 konnten durch höhere Energiedichten Märkte für kompaktere Konsumanwendungen (3C-Märkte: Computer, Communication, Consumer) erschlossen werden. Während NiMH-Batterien in den letzten Jahren noch einmal ihre Anwendung in Hybridfahrzeugen (HEV) gefunden haben, werden sie aktuell zunehmend durch die leistungsfähigeren und immer günstigeren LIB ersetzt. Ihren Zenit dürften NiMH⁵ um 2020 erfahren, bei einer Nachfrage von wenigen GWh. Lithium-Ionen-Batterien hingegen erzielen heute bereits eine Nachfrage von rd. 100 GWh und werden spätestens um 2025 die Nachfrage innerhalb der Batterietechnologien dominieren. Bleibatterien dürften spätestens bis zu diesem Zeitpunkt ihren Zenit erreicht haben, auch wenn sie aktuell durch die Entwicklung der Nachfrage nach stationären Energiespeichern (z. B. netzgebundene Heimspeicher) sowie ihrem noch vorliegenden Kostenvorteil gegenüber LIB neuen Schwung in der Nachfrage erfahren haben.

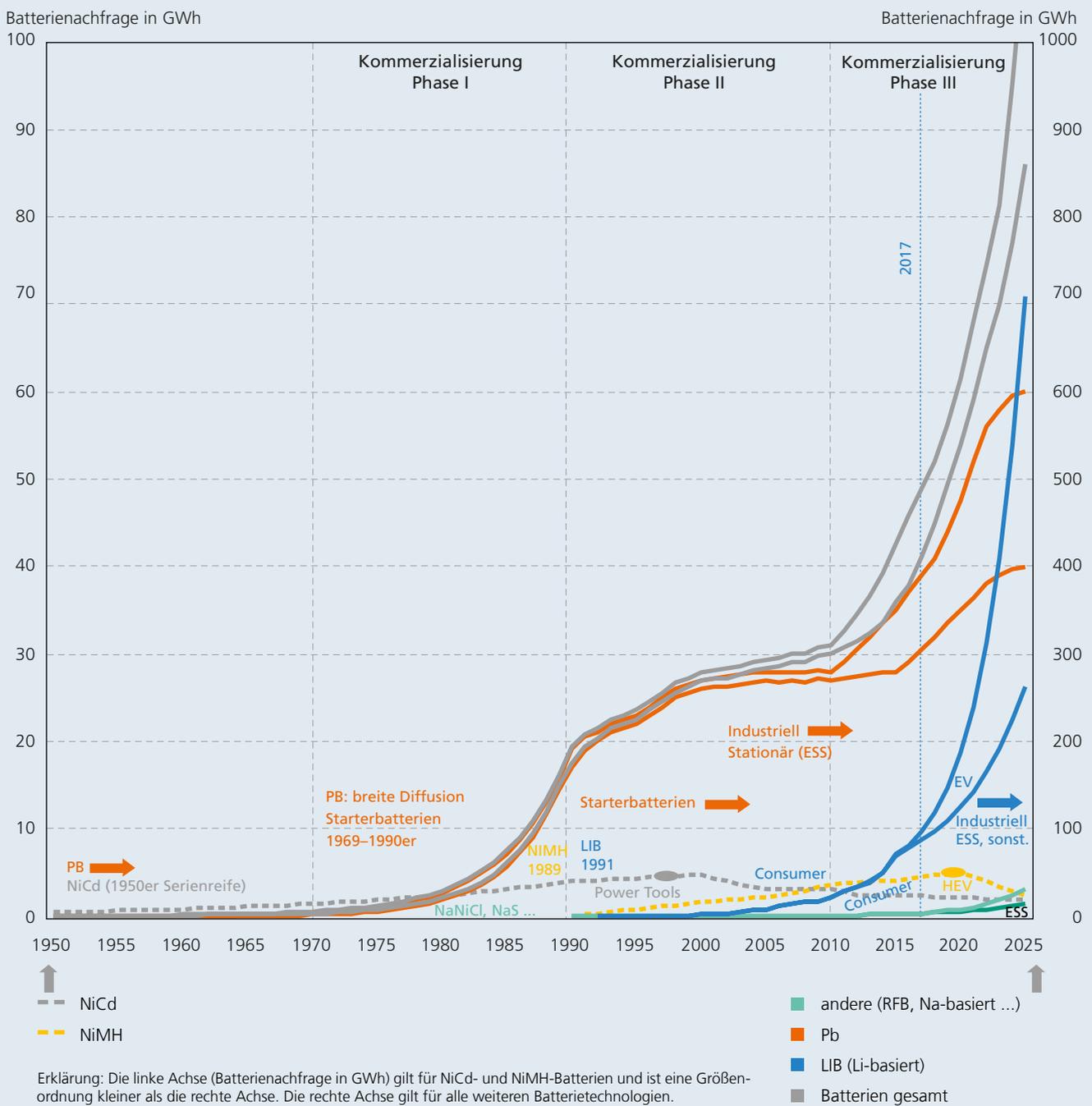
Eine Reihe weiterer Batterietechnologien mit heute noch vergleichsweise geringer Nachfrage wie Redox-Flow-Batterien, Natrium-Schwefel, NaNiCl-Batterien sowie Systemen mit besonderem Fokus auf Kostenvorteilen gegenüber etablierten Energiespeichern befinden sich ebenfalls in der Entwicklung und sind aus heutiger Sicht in der Regel besonders für stationäre Anwendungen geeignet. Anhand des typischen Verlaufs der Batterienachfrage in Form sogenannter S-Kurven (dies sind logistische Funktionen, welche nach einem exponentiellen Anstieg in eine Sättigung übergehen), können folgende Kommerzialisierungsphasen für die Batterietechnologien identifiziert werden:

Kommerzialisierung Phase I: So stellt die breite Diffusion der Bleibatterien zwischen den 1970er- und 1990er-Jahren eine erste Phase der Kommerzialisierung und zugleich einen ersten wirklichen Massenmarkt für Batterien dar. Die Marktnachfrage wäre in den 1990er-Jahren in eine Sättigungsphase übergegangen.

Kommerzialisierung Phase II: Die Diffusion der LIB zwischen den 1990er-Jahren bis 2010 kann als zweite Phase der Kommerzialisierung gesehen werden, wobei die Nachfrage nach LIB bis um 2010 gerade einmal rd. 10 Prozent der gesamten Batterienachfrage ausmacht und 90 Prozent auf Pb-Batterien entfallen. Allerdings ergeben sich mit den Konsumanwendungen (3C) ebenso wie mit industriellen und stationären (off-Grid) Anwendungen neue Märkte.

Kommerzialisierung Phase III: Mit dem Beginn der Elektromobilität um 2010 (insbesondere BEV/PHEV)⁶ wurde eine neue Phase der Kommerzialisierung eingeleitet, welche durch die Entwicklung optimierter Lithium-Ionen-Batterien für Hochenergie (automotive) Anwendungen bestimmt ist. Mit der weiteren Optimierung der Energiedichte und der Kostenreduktion sowie der Ausdifferenzierung, z. B. auch der größeren Zellformate (größere 21700 zylindrische Zellen, großformatige Pouch und prismatische Zellen), erschließen LIB weitere Märkte in der Elektromobilität (EV), in stationären Anwendungen (ESS) und Consumer-Anwendungen (3C), also tragbaren Geräten.

Historische Entwicklung der globalen Batterienachfrage und Zukunftsszenarien⁷



BATTERIE-NACHFRAGE UND PRODUKTION BIS 2030+

Mit der extrem dynamischen Entwicklung der globalen Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien, welche spätestens um 2030 im Bereich von einer TWh liegen dürfte, ergeben sich eine Reihe zentraler Fragen mit strategischer Relevanz für künftige FuE-Schwerpunkte, Investitionsentscheidungen und schließlich Geschäftsmodelle für Zulieferer, Systemintegratoren und Dienstleister:

Batterie-Nachfrage

Als wie robust sind diese Nachfrageprognosen einzuschätzen und wie stark können sie variieren? Je nach Entwicklung können unterschiedliche Kostendegressionen damit verbunden sein, da sich Skaleneffekte unterschiedlich schnell erzielen lassen.

Zur Beantwortung der **Nachfrageprognosen** haben wir die drei Diffusionsszenarien für Elektromobilität aus dem Energiespeicher-Monitoring⁸ des Fraunhofer ISI 2016 um die Nachfrageprognosen für stationäre und Konsumer-Anwendungen ergänzt [Szenario „technologische Diffusion“ mit der Annahme, dass sich die Nachfrage parallel mit der technischen Evolution und Eignung für Anwendungen entwickelt (pessimistisch), Szenario „frühe Diffusion“ mit der Annahme, dass sich ein Technologie-Push z. B. durch die aktive Entwicklung eines Angebots von OEM und anderen Systemanbietern ergibt (Trend) und Szenario „erzwungene Diffusion“ mit der Annahme, dass zudem ein massiver staatlicher Eingriff erfolgt, z. B. durch Regulierung, Gesetzgebung wie Elektroauto-Quoten, Verbrennerverbote etc. (optimistisch)].

Die Szenarien für die globale Nachfrage nach LIB über alle Anwendungsfelder, Zellchemien und Zellformate hinweg sind in der Abbildung durch die drei grünen Linien dargestellt. Eine Auswertung mehrerer Marktprognosen⁹ zwischen 2013 und 2017 zeigt, dass diese bis 2020 innerhalb der drei Diffusionsszenarien des Fraunhofer ISI liegen. Bis 2025 liegen die Marktprognosen im Wesentlichen im Bereich zwischen dem pessimistischen und dem Trendszenario des Fraunhofer ISI (ältere Prognosen sind tendenziell noch pessimistischer und aktuellere Prognosen liegen im Bereich des Trendszenarios).

Einzelne Prognosen reichen sogar über das optimistische Szenario hinaus, allerdings ist bis 2025 mit einer entsprechenden Nachfragedynamik zu rechnen, sodass spätestens im Folgejahr solche Prognosen in den Szenarien eingeschlossen wären. Die Nachfrageszenarien ebenso wie einzelne Marktprognosen variieren also bis 2025 bis zu einem Faktor vier und legen Wachstumsraten zwischen 12 und 26 Prozent für die globale LIB-Nachfrage zugrunde.

Batterie-Angebot bzw. Produktion

Werden auch entsprechende Produktionskapazitäten aufgebaut oder kann es künftig zu Über- oder Unterkapazitäten kommen?

Eine Auswertung der bislang aufgebauten und bis 2025 angekündigten globalen **Zellproduktionskapazitäten** (blaue Linie) zeigt, dass nach einem durchschnittlichen Zubau von 15 GWh zwischen 2013 und 2016 in den kommenden Jahren jährlich rund 50 GWh an Zellproduktionskapazitäten bis auf fast 700 GWh um 2025 zugebaut werden sollen. Die Ankündigungen beinhalten etablierte asiatische Player wie Panasonic (JP), LG Chem (KR), Samsung SDI (KR), SKI (KR), BYD (CN), Lishen (CN), CATL (CN), CALB (CN), OPTIMUM (CN) und zahlreiche weitere chinesische Zellhersteller. Ebenso sind Ankündigungen neuer Player wie TerraE (DE), Northvolt (SW), Boston Energy (US, AU), Energy Absolute (Thailand) mit jeweiligen Ausbaustufen berücksichtigt.¹⁰

Die Kapazitätsauslastung einer Fabrik ist jedoch nie 100 Prozent. Bei einem Auslastungsgrad von dauerhaft über 85 Prozent denken Hersteller in der Regel über eine Kapazitätserweiterung nach. Der Rest dient als Puffer. Für die real genutzte Produktionskapazität rechnen wir also nur mit Werten um 85 Prozent. Eine Fabrik produziert zudem nie ausschließlich Gutteile. Gut eingefahrene Fabriken haben eine Ausbeute von über 90 Prozent. Die Ausbeuten in der Batterieproduktion liegen heute teilweise noch darunter. Daher ziehen wir auch hier 10 Prozent von der Vollkapazität ab.¹¹ Im Ergebnis errechnen wir eine reale Produktionskapazität (näherungsweise Produktion, rote gestrichelte Linie), welche wir den Nachfrageszenarien gegenüberstellen. Weiterhin ist zu

berücksichtigen, dass gerade bei neuen Zellherstellern ggf. mit einer Verzögerung zu rechnen ist, bis künftige Produktionsstätten tatsächlich in Betrieb gehen und die Ramp-up-Phase durchlaufen haben. Aktuell besteht sogar das Problem bei der Tesla/Panasonic Gigafactory, welche durch Produktionsverzögerungen zu weltweiten Lieferengpässen bei zylindrischen Zellen führt.¹² Alleine bei einer Verzögerung um 2 Jahre lägen Produktion und Nachfrage (z. B. im Trendszenario, rote gestrichelte Linie vs. mittlere grüne Linie) bereits wieder aufeinander. Auch regionale Abhängigkeiten, Qualität und Eigenschaften (Chemie, Format etc.) der Zellen, Lagerkäufe sowie Zuliefer-Abnehmerbeziehungen sind im Detail zu berücksichtigen und verringern/verzögern die Verfügbarkeit anwendungsspezifisch geeigneter Zellen. Selbst bei der Betrachtung der realen Produktion bis 2025 wird deutlich, dass in dem aus heutiger Sicht eher zu erwartenden Trend-

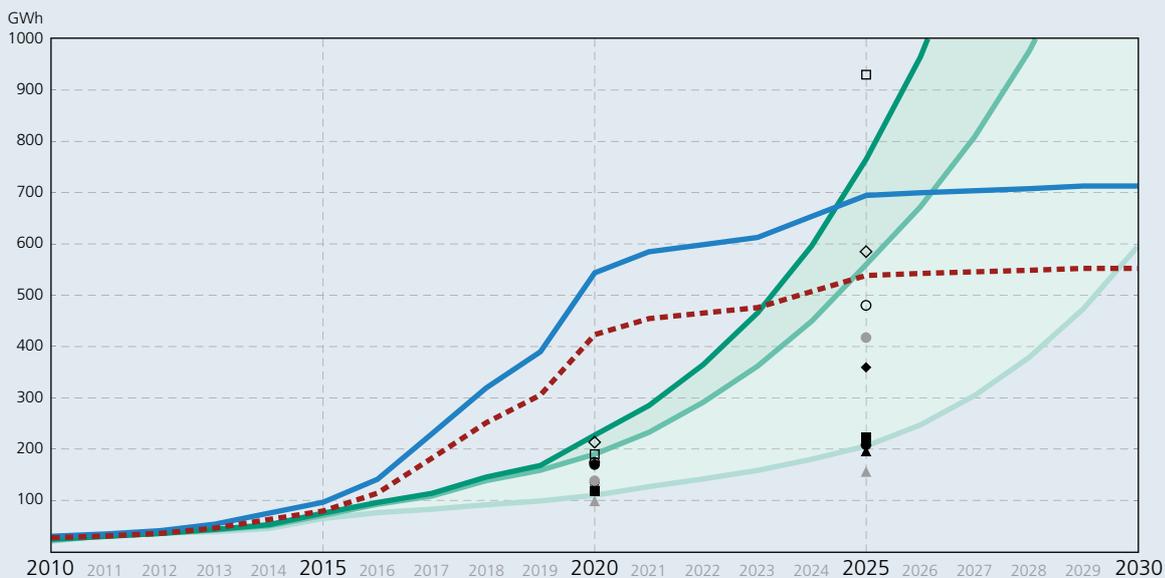
szenario ein weiterer massiver Zubau an Zellproduktionskapazitäten spätestens ab 2025 erforderlich wird, um die wachsende Nachfrage zu bedienen.

Anwendungen

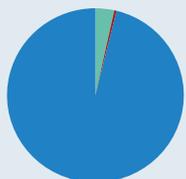
In welchen Anwendungen werden die Batterien nachgefragt? Welche Anwendungen sind Treiber und definieren ggf. die Anforderungen an die künftige Batterieentwicklung?

Mit Blick auf die **Anwendungen** zeigt das Trendszenario eine zunehmende Nachfrage nach LIB durch Elektrofahrzeuge. Während in 2010 noch fast 100 Prozent der Nachfrage durch Konsumer-Anwendungen bzw. tragbare Geräte (3C) entstand, so lag die Nachfrage in 2015 schon fast zu gleichen Teilen bei

Globale Nachfrage vs. Produktionskapazitäten von LIB-Zellen (2010–2030)⁸⁻¹¹
(Stand 12/2017)

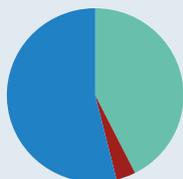


<25 GWh (2010)



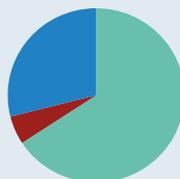
EV 4 %
ESS 0 %
3C 96 %

~70 GWh (2015)



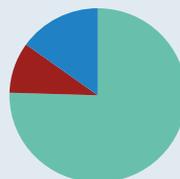
EV 43 %
ESS 3 %
3C 54 %

Trend Szenario (2020)



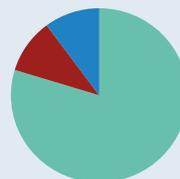
EV 66 %
ESS 5 %
3C 29 %

Trend Szenario (2025)



EV 76 %
ESS 9 %
3C 15 %

Trend Szenario (2030)



EV 80 %
ESS 10 %
3C 10 %

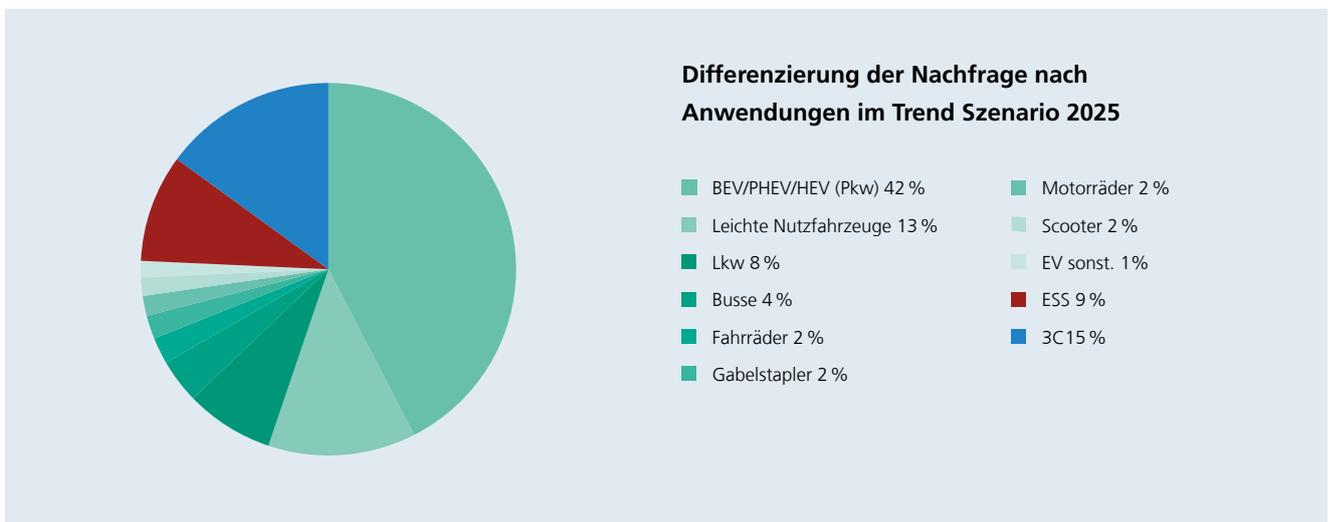
3C- und EV-Anwendungen. In den kommenden Jahren wird bei 3C-Märkten mit Wachstumsraten von 5 bis 10 Prozent gerechnet, wobei die Nachfrage nach Laptop-Batterien etc. bereits eingeschwungen ist und im Bereich weniger Prozent liegt. Neue Nachfrageentwicklungen im 3C-Markt mit höheren Wachstumsraten ergeben sich durch Power Tools, medizintechnische Anwendungen (z. B. Hörgeräte) und künftig vermutlich zunehmend Wearables im Kontext von Freizeitanwendungen, Sport etc.¹³ Der Markt für stationäre Speicher (ESS) wächst in den kommenden Jahren mit 18 bis 36 Prozent (je nach Marktprognose) und liegt aktuell bei wenigen GWh. Hier setzen sich LIB zunehmend gegenüber einem breiteren Portfolio elektrochemischer Speicherlösungen durch. Dezentrale Speichertechnologien gewinnen insgesamt an Bedeutung gegenüber zentralen Großspeichern wie z. B. Pumpspeichern. Da aber der Markt für Elektrofahrzeuge bereits heute bei über 50 GWh liegt (Elektro-Pkw, Busse, Lkw, Fahrräder, Gabelstapler etc.) und auch hier die Wachstumsraten in den kommenden Jahren bei 18 bis 36 Prozent liegen, wird sich der Nachfrageanteil bei EV im Trendszenario bis 2020 auf 66 Prozent, bis 2025 auf 76 Prozent und langfristig auf 80 Prozent und höher entwickeln. Darunter fällt wiederum der Nachfrage nach Elektro-Pkw (BEV, PHEV, HEV) die größte Bedeutung zu.

Eine **Differenzierung der Nachfrage** nach Anwendungen im Trendszenario für 2025 zeigt die dominierende Nachfrage nach BEV/PHEV/HEV-Batterien für Elektro-Pkw (42 Prozent globale Nachfrage). Allerdings entwickelt sich mittlerweile eine Diffusion auch in weitere Mobilitätsmärkte bzw. -konzepte wie Nutzfahrzeuge (leichte Nutzfahrzeuge, Busse, Lkw) sowie Elektro-Fahrräder, -Motorräder, -Scooter, -Gabelstapler etc.

Regionale Verteilung

In welchen Ländern bzw. Weltregionen werden die Batterien nachgefragt? Werden Produktionskapazitäten künftig nahe am Absatzmarkt aufgebaut oder müssen Batterien in großer Stückzahl exportiert/importiert und damit transportiert werden?

Eine Auswertung der **regionalen Verteilung der Produktion** (Ankündigungen bis 2025 nach Standorten der Produktion) und Nachfrage (Trendszenario) für das Jahr 2025 zeigt, in welchen Ländern die rd. 500–600 GWh Batteriekapazität aufgebaut sowie nachgefragt werden dürften. Auch wenn China seit 2015 enorme Produktionskapazitäten aufgebaut hat (derzeit geschätzt rd. 70 Prozent der globalen Produktionskapazitäten),



so wird durch den Zubau in anderen Ländern bis 2025 wieder ein Ausgleich geschaffen. China stellt dennoch auch langfristig die Weltregion mit der absolut größten Nachfrage sowie Zellproduktion von rd. 50 Prozent dar und ist zugleich in höchstem Maß ein Binnenmarkt, d. h. Komponentenherstellung, Zellherstellung bis Anwendungen liegen entlang der Wertschöpfungskette nahezu vollständig im Land. Zudem sind die Hersteller aufgrund des Protektionismus fast ausschließlich chinesische Unternehmen bzw. Kooperationen von chinesischen mit ausländischen Unternehmen. Für die USA und Japan zeigt sich ebenso, dass Produktions- und Nachfrageanteile in 2025 in etwa ähnlich ausfallen dürften. Dabei bauen asiatische Zellhersteller (insbesondere Panasonic/Tesla aber auch LG Chem etc.) am Standort USA Produktionskapazitäten entsprechend der Nachfrage aus. In Japan bauen die heimischen Zellhersteller ebenfalls entsprechend der dortigen Nachfrage aus. Eine Exportstrategie wird offenbar mit dem Ausbau an Standorten in anderen Ländern verfolgt (insbesondere USA gemeinsam mit Tesla). Die koreanischen Zellhersteller hingegen bauen die heimische Zellproduktion offenbar stärker aus als die Nachfrage im eigenen Land entsteht. LG Chem, Samsung SDI und SKI errichten zudem Produktionskapazitäten in ihren Absatzländern China, USA und der EU.

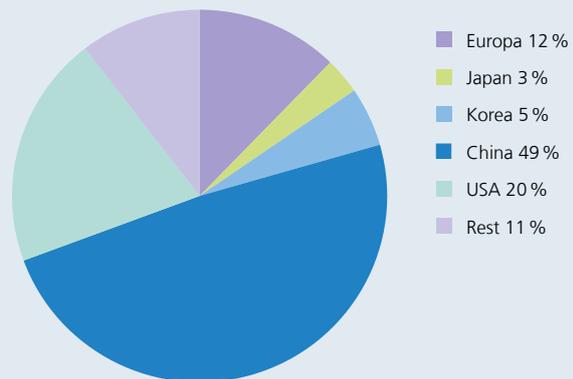
Mit den angekündigten Zellproduktionskapazitäten in Europa dürften trotz TerraE (DE, 34 GWh bis 2028) und Northvolt (SW, 32 GWh bis 2025) sowie dem Ausbau durch LG Chem in Polen sowie SDI und SKI in Ungarn insgesamt zwar rd. 12 Prozent der globalen Batteriezellproduktion aufgebaut werden, diese dürften jedoch gerade die Hälfte der bis dahin entstehenden Nachfrage abdecken. Europa wird sich also in den kommenden Jahren zu einem zunehmenden Nachfragemarkt entwickeln, sowohl als Absatzmarkt für Batterien (B2B) aufgrund der Automobilhersteller aber auch weiterer Systemintegratoren in der Fahrzeugindustrie, Logistik, Energiewirtschaft, sonstiger Konsumgüter etc. als auch aus Sicht des Endkundenmarktes (B2C).

Durch die hohe Volatilität der Marktentwicklung in den kommenden Jahren stellt sich die Frage, wie stark sich die Nachfrage und Produktion nach Anwendungen und Regionen ändern kann, falls sich eine pessimistischere oder noch optimistischere Entwicklung ergibt. Dabei lässt sich feststellen, dass im optimistischeren Fall die Nachfrage nach xEV, insbesondere in China, noch höher ausfallen würde. Im pessimistischeren Fall dürfte ebenfalls die Nachfrage nach xEV, und diese besonders in China, geringer ausfallen. Die Nachfrageanteile nach LIB für 3C- und ESS-Anwendungen dürften entsprechend etwas geringer (optimistisches Szenario) bzw. höher (pessimistisches Szenario) ausfallen. An den grundsätzlichen durch Betrachtung des Trendszenarios gewonnen Erkenntnissen dürfte sich jedoch nichts Wesentliches ändern. Dennoch sind ein kontinuierliches Monitoring und eine Aktualisierung der Entwicklungen nötig.

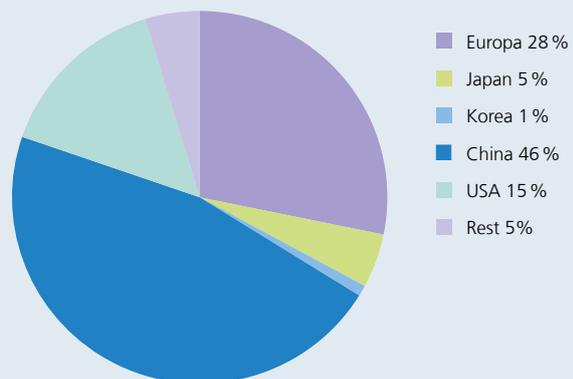
Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien

Wie die Analyse der Nachfrage- und Produktionsentwicklung zeigt, spielt die Elektromobilität und hier insbesondere Elektro-Pkw eine zentrale Rolle für die zukünftige Batterieentwicklung. Dabei stellt die Automobilindustrie besondere Anforderungen an noch höhere Energiedichten, weiter sinkende Batteriekosten sowie weitere Anforderungen wie u. a. Schnellladefähigkeit. Zudem kommen unterschiedliche Zellformate wie größere zylindrische und großformatige Pouch und prismatische Zellen für eine Auslegung in Elektrofahrzeugen in Betracht. Wettbewerbsfähige Zellhersteller, welche zukünftig in Europa produzieren wollen, ob heimisch oder aus Asien, werden diese Anforderungen daher adressieren müssen.

**LIB Produktion nach Standorten in 2025
(im Trendszenario)**



**LIB Nachfrage nach Regionen in 2025
(im Trendszenario)**



ROADMAPPING-METHODIK

Die „Energiespeicher-Roadmap 2017 – Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien“ aktualisiert und vertieft die zwischen 2010 bis 2015 erschienenen neun Roadmaps des Fraunhofer ISI mit Fokus auf Batterien für zukünftige elektromobile (EV), stationäre (ESS) sowie weitere Anwendungen (3C) von Lithium-Ionen-Batterien.

Hochenergie-Batterien 2030+

Vor dem Hintergrund der in der Einleitung aufgeworfenen Fragen gibt die vorliegende Roadmap einen umfassenden Überblick über den Stand und die Entwicklungspotenziale von Hochenergie-Lithium-Ionen-Batterien (LIB) bzw. lithiumbasierten Batterien, mit besonderem Fokus auf Elektrofahrzeuge und deren künftigen Anforderungen an die Energiespeicher:

- **Leistungsparameter:** Die Roadmap geht auf die technischen Anforderungen und Entwicklungsperspektiven der Leistungsparameter für die künftig global produzierten und nachgefragten Batterietechnologien in den einzelnen Zellformaten (zylindrisch, Pouch, prismatisch) ein. Neben der Energiedichte und Kosten auf Zellebene erweitert die Roadmap auch den Blick auf die Modul- bis Systemebene.
- **FuE-Herausforderungen:** Die Roadmap identifiziert und benennt 25 FuE-Herausforderungen vom Material, der Prozesstechnik über Zellkomponenten bis hin zum Gesamtsystem. Dabei werden Vorteile/Nutzen und Nachteile/Aufwand aller Lösungsansätze zur Entwicklung künftiger Hochenergie-Batterien vergleichend betrachtet und die Lösungsansätze (sogenannte Red Brick Walls) in einen zeitlichen Kontext (Meilensteine) gebracht.

Durch die Definition von Anforderungen an Leistungsparameter sowie die Identifikation von Lösungsansätzen stellt die Roadmap Hochenergie-Batterien 2030+ eine normative Roadmap dar, in welcher konkret zu lösende FuE-Aufgaben für die kommenden 10 bis 15 Jahre benannt werden.

Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien

Langfristig bleibt aber offen, ob sich alle Herausforderungen und Entwicklungen zeitlich genauso umsetzen lassen oder ob die Entwicklung von lithiumbasierten Hochenergie-Batterien künftig an Grenzen stoßen könnte.

- **Rahmenbedingungen und Benchmark:** Bei einer künftigen (Neu-)Bewertung alternativer bzw. neuer Batterietechnologien und ihrer (potenziellen) Anwendungen könnten sich daher Rahmenbedingungen und damit auch Anforderungen ändern. So könnten Ressourcenverfügbarkeit und Nachhaltigkeit zukünftig noch wichtigere oder entscheidende Parameter werden, auch wenn diese mit schlechteren Leistungsparametern alternativer Batterietechnologien „erkaufte“ werden müssen.
- **Entwicklungspotenziale:** Allerdings brauchen zukünftige Batterietechnologien Zeit, um ihre Potenziale mit Blick auf Anwendungen zu bewerten. Dabei ist eine kontinuierliche und frühzeitige Rückkopplung der Entwicklungspotenziale vs. möglicher Anwendungen und Verwertung nötig.

Durch das Aufzeigen von **Langfristperspektiven zukünftiger Batterietechnologien**, welche in der Regel an disruptive Lösungsansätze geknüpft sind, sowie eine Einschätzung des Mehrwerts der Technologien für bestimmte Anwendungen und des Potenzials sich zu einer alternativen Batterietechnologie zu entwickeln, wird eine explorative Roadmap entwickelt. Diese hebt mögliche, realistische Entwicklungsrichtungen, deren Herausforderungen sowie Vorteile/Nutzen und Nachteile/Aufwand hervor und soll eine langfristige Forschungsstrategie für den Standort Deutschland unterstützen.

Die Roadmap adressiert damit die unter dem BMBF-Programm „Batterie 2020“ gesetzten Schwerpunktthemen.

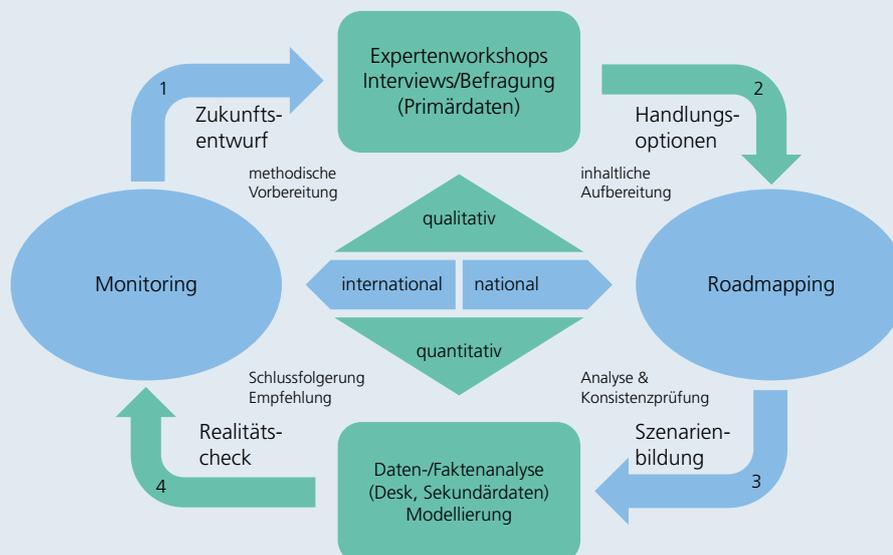
Vorgehen: Iterativer Prozess und abgestimmter Methoden-Einsatz

Der Erstellung der „Energiespeicher-Roadmap 2017“ liegt ein methodisch gestütztes Vorgehensmodell zugrunde. Hierbei werden qualitative und quantitative Forschungsmethoden kombiniert. Ebenso erfolgt jeweils (soweit möglich) ein Abgleich der nationalen (teilweise EU) Perspektive der Roadmap mit internationalen Entwicklungen, wodurch das Roadmapping durch ein Monitoring ergänzt und gestützt wird.

Das Vorgehen folgt den in der Grafik angedeuteten vier Schritten: In einem ersten Schritt wird auf Basis von Desk-Recherchen und Studienanalysen ein Rahmen für einen Zukunftsentwurf methodisch vorbereitet, welcher die Roadmap-Architektur darstellt und in Expertenworkshops (mit typischerweise 10 bis 20 für den Abdeckungsbereich der Roadmap einschlägigen Experten aus Wissenschaft und Industrie) inhaltlich erarbeitet wird.¹⁴ Hierdurch

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

Vorgehen und Methodik im Energiespeicher-Roadmapping und -Monitoring



ROADMAP HOCHENERGIE-BATTERIEN 2030+

ANFORDERUNGEN AN LEISTUNGSPARAMETER KÜNFTIGER HOCHENERGIE-BATTERIEN (BIS ZELLE)

Anforderungen und Prämissen

Die Automobilindustrie treibt die Anforderungen an optimierte Fahrzeugbatterien, wobei die Erhöhung der Energiedichte für höhere Reichweiten und zugleich die Kostenreduktion der Batterien im Fokus stehen. Dabei haben sich mit der Festlegung der Maße für den Bauraum in Elektrofahrzeugen insbesondere die Anforderungen an die volumetrische Energiedichte verschärft, um gegenüber heute typischerweise 30–40 kWh Batteriekapazität zukünftig z. B. 60–80 kWh im selben Bauraum unterzubringen. Mit der gleichzeitigen Kostensenkung sollen sich dabei die Gesamtkosten der Elektrofahrzeuge dennoch reduzieren aber die Reichweite entsprechend erhöht werden (siehe Reichweite-optimierte BEV in Thielmann et al. 2015).¹⁵

Zusätzlich sollen künftige Fahrzeugbatterien schnellladefähig (ca. 1 C) sein, um ein BEV künftig beim kabelgebundenen DC-Schnellladen mit Leistungen von bis zu 400 kW in wenigen Minuten laden zu können.¹⁶ Die Mindestanforderung an die Lebensdauer (derzeitige Anforderung von 1000 bis 2000 Zyklen und 8 bis 10 Jahre)¹⁷ soll dabei weiter gewährleistet bleiben, um z. B. 300 000 km Fahrleistung erzielen zu können. Künftig wären aber auch 1000 Zyklen für BEV ausreichend.

Unter Berücksichtigung dieser Prämissen bzw. Anforderungen (BEV mit 60–80 kWh, 1 C Laderate, 1000 Zyklen, 8–10 Jahre Lebensdauer) stellt sich die Frage, wie sich optimierte Hochenergie-Batterien in den kommenden Jahren, insbesondere bis 2030+, weiterentwickeln können, welche material- und prozesstechnischen Herausforderungen bestehen, um diese auch in die Massenproduktion zu bringen, und welche Energiedichten und Kosten sich für zukünftige Fahrzeugbatterien schließlich erreichen lassen.

Zellformate

Dabei ist zudem zu berücksichtigen, dass heute in den bis Ende 2017 über 3 Millionen weltweit verkauften Elektroautos (nur PHEV/BEV) alle Zellformate (zylindrisch, prismatisch, Pouch) und

die wesentlichen Zellchemien (NCA, NMC, LMO, LFP) vertreten sind. Neben der Frage der optimalen Zellchemien und Entwicklungen der Komponenten (Kathode, Anode, Elektrolyt, Separator bis Zelle) stellt sich daher auch die Frage, wie sich die Entwicklungen der Batterietechnologie auf die einzelnen Zellformate und schließlich Module/Packs und im Gesamtsystem bei der Fahrzeugintegration auswirken.

Mit Blick auf die Zellformate produziert z. B. Samsung seine (NMC-basierten) Zellen insbesondere in prismatischer Form (z. B. im BMW i3 verbaut), während LG Chem diese (ebenso NMC-basierten Zellen) noch vornehmlich als Pouch fertigt (z. B. im Renault ZOE verbaut). Panasonic stellt seine (NCA-basierten) Zellen hingegen in zylindrischer (18650er) Form her und wird mit der ab 2017 im 21700er-Format in der Gigafactory (Nevada, USA) produzierten Zelle bis 2025 sukzessive auf NMC umstellen (Tesla Model S, Model 3 etc.). Bei der Zellchemie chinesischer Batteriehersteller (wie z. B. Lishen Tianjin, BYD) handelt es sich wiederum heute noch überwiegend um LFP-basierte Zellen. Aber auch chinesische Zellhersteller wollen bis 2020 zunehmend auf NMC-basierte Zellen umsteigen. Je nach Zellchemie, -geometrie und -format besitzt die Zelle eine andere Energiedichte und weist eine unterschiedliche Lebensdauer und Sicherheit auf.¹⁸

Somit sind in einer Roadmap für Hochenergie-Batterien die Entwicklungen sowohl der Zellchemien, -komponenten, -formate bis hin zur Bewertung des Gesamtsystems zu betrachten.

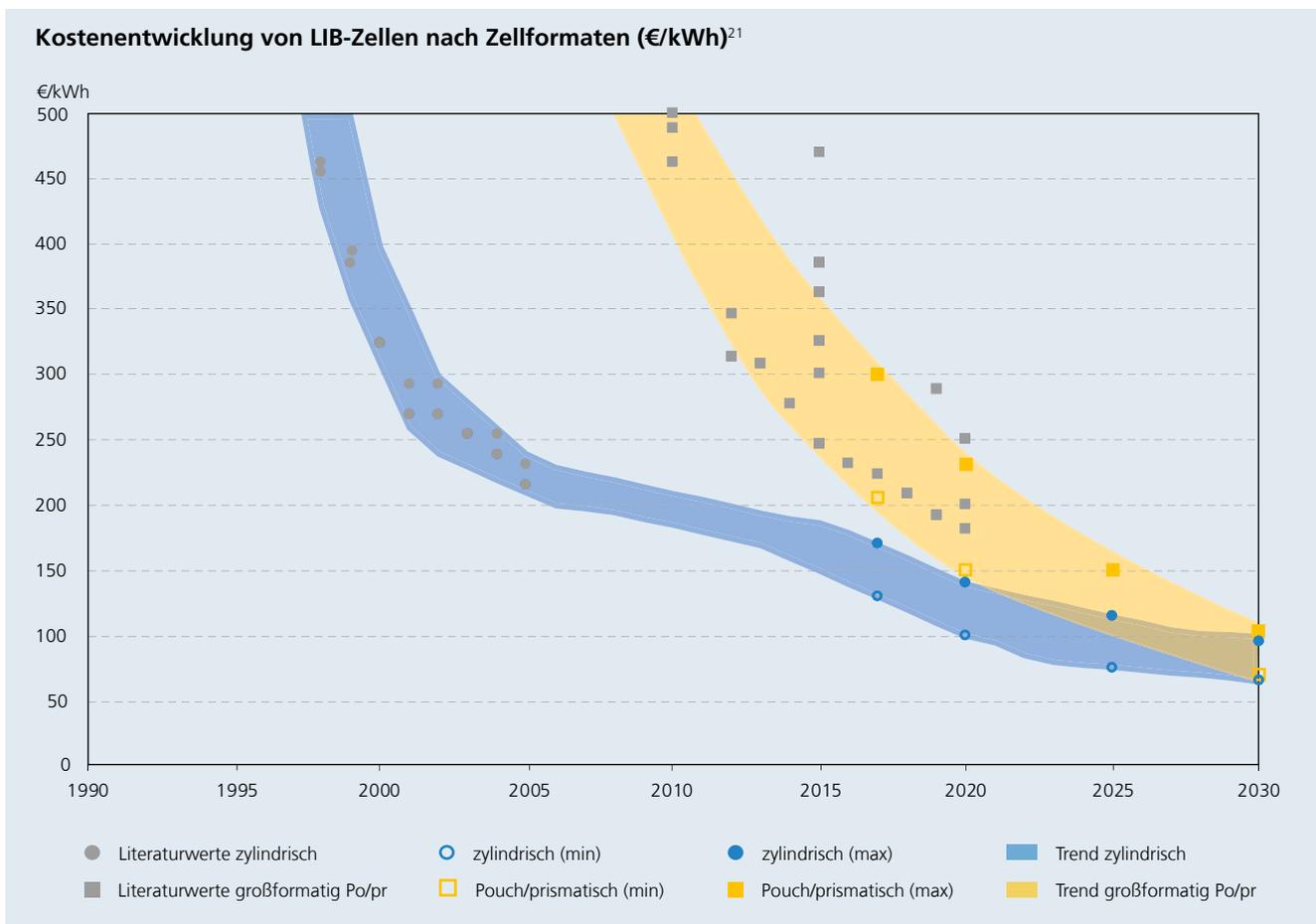
Entwicklung der Zellkosten

Eine auf Literatur und Marktstudien basierte Abschätzung der Kostenentwicklung optimierter LIB-Zellen (in €/kWh) für zylindrische 18650er-Zellen (historisch) sowie größere zylindrische Zellen (z. B. künftige 21700er) zeigt, dass diese aktuell im Bereich um 150 €/kWh und darunter liegen und zwischen 2020 und 2030 ggf. auf 60–100 €/kWh fallen könnten. Die obere Grenze gilt dabei für 18650er-Zellen und die untere Grenze (zukünftig) für größere zylindrische Zellen. Diese Kostenentwicklung hängt zudem von dem Ausbau der Produktion (Skaleneffekte

und kumulierte Produktion) ab und unterstellt eine dynamische Entwicklung der Nachfrage (Trend- bzw. optimistisches Szenario). Zudem sind Material- und Prozessinnovationen unterstellt, welche es erlauben, den Materialeinsatz und damit verbundene Kosten zu reduzieren und schließlich Zell- und Modulkosten immer stärker an die durch die Materialkosten definierte Grenze heranzuführen. Aktuelle Marktstudien gehen für das Jahr 2017 sogar von Zellkosten für zylindrische Panasonic-Zellen von etwa 115 €/kWh und bis 2020–2025 von 75 bis unter 70 €/kWh aus.¹⁹ Für großformatige Pouch und prismatische Zellen, welche in den letzten Jahren bereits auf 300–400 €/kWh gefallen sind und derzeit bei 200–300 €/kWh (für etablierte, größere Zellhersteller) liegen, dürften die Zellkosten für optimierte Hochenergie-

Batterien bis 2025–2030 unter die 100 €/kWh Marke fallen können und schließlich im Bereich der Kosten für zylindrische Zellen liegen. Auch hier gehen aktuelle Marktstudien für Pouchzellen (z. B. von LG Chem) und prismatische Zellen (z. B. von CATL) von 165–190 €/kWh und bis 2025 von rd. 75 €/kWh aus.²⁰

Die in der Abbildung „Kostenentwicklung von LIB Zellen“ eingezeichneten Zellkosten sind diesen Prognosen gegenüber konservativer und dürften eine mittlere Kostenabschätzung wiedergeben, welche auch mögliche Ressourcenengpässe und Preissteigerungen etc. berücksichtigen. In jedem Fall wird zwischen 2020 und 2025 erwartet, dass sich die Kosten aller Zellformate annähern.



ANFORDERUNGEN AN LEISTUNGSPARAMETER KÜNFTIGER HOCHENERGIE-BATTERIEN (BIS ZELLE)

Entwicklung der Energiedichten auf Zellebene

Für die Entwicklung der gravimetrischen Energiedichten (Wh/kg) auf Zellebene zeigt sich ebenfalls eine zunehmende Annäherung der drei Zellformate. Zylindrische 18650er-Zellen dürften von heute max. 270 Wh/kg zukünftig ggf. 300 Wh/kg erreichen. Mit den größeren 21700er-Zellen wird erwartet ggf. 350 Wh/kg zu erreichen. Großformatige Pouch und prismatische Zellen liegen heute noch bei 150–180 Wh/kg (Pouch) bzw. 120–140 Wh/kg (prismatisch) und dürften ebenfalls langfristig 350 Wh/kg erreichen (prismatische Zellen erreichen evtl. geringere Energiedichten bzw. erst später).

Mit Blick auf die volumetrischen Energiedichten (Wh/l) auf Zellebene wird für 18650er-Zellen eine Grenze bei rd. 800 Wh/l erwartet, während größere 21700er-Zellen um die 1000 Wh/l erreichen dürften. Großformatige Pouch und prismatische Zellen liegen heute noch bei 250–450 Wh/l (Pouch) bzw. 230–350 Wh/l (prismatisch) und dürften langfristig 1000 Wh/l erreichen (für prismatische Zellen bleiben maximal erreichbare Energiedichten ggf. auch langfristig unterhalb 1000 Wh/l).

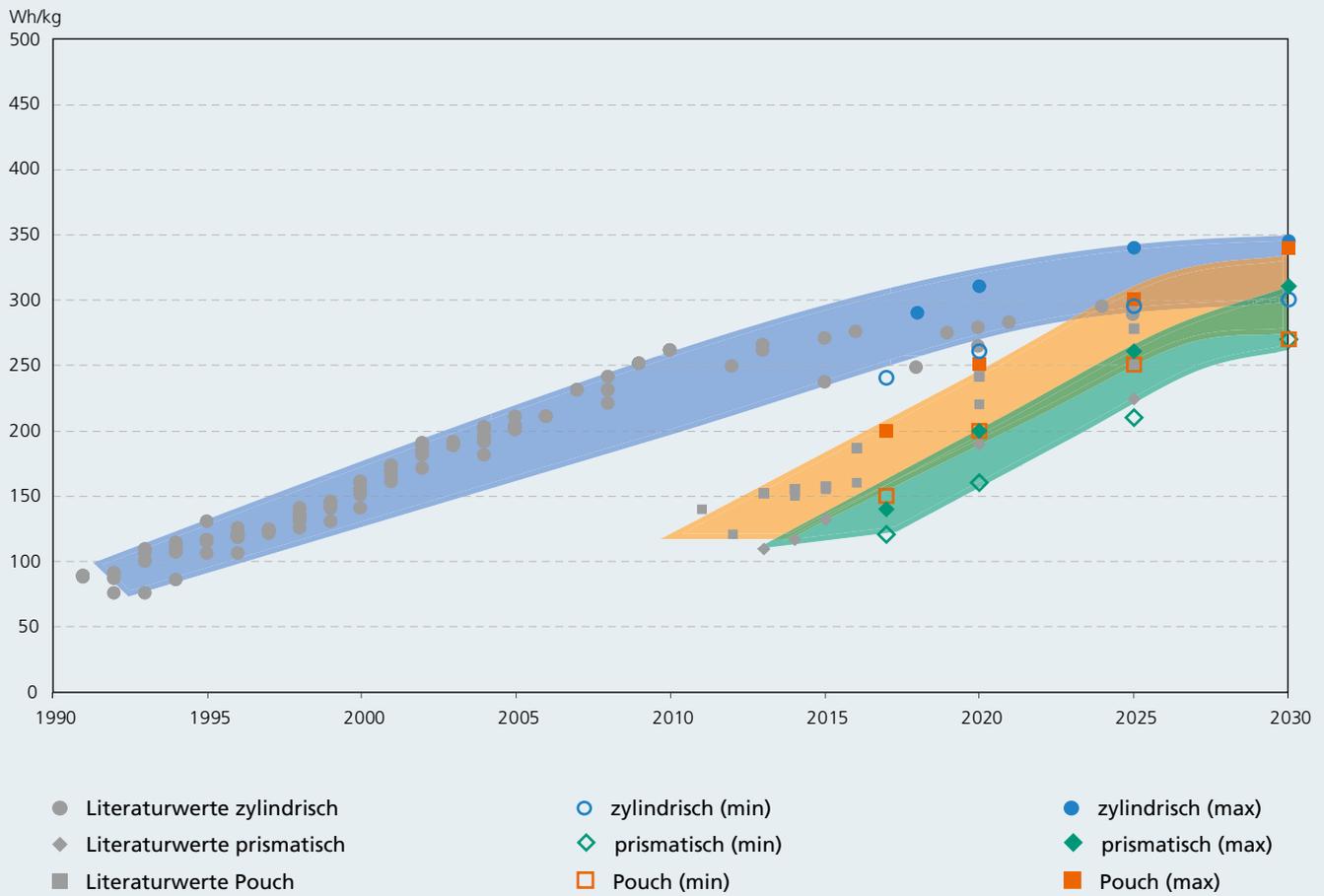
Die Entwicklungsperspektiven für die Energiedichten der einzelnen Zellformate hängen dabei von mehreren Faktoren ab: Heute werden zwar Kathodenmaterialien mit höheren Ni-Anteilen eingesetzt (z. B. NMC 532, 622) allerdings unter Beimischung (Blends) weiterer Aktivmaterialien mit geringerer spezifischer Kapazität, was aus Sicherheitsgründen erfolgt. Dies führt zu geringeren Energiedichten als z. B. für 18650er-Zellen, welche heute noch NCA-Kathoden (jedoch ohne Blends) einsetzen.

Erst in den kommenden Jahren werden in allen Zellformaten gemäß der Entwicklungspläne weltweiter Zellhersteller nickelreiche Hochenergie-Kathoden (NMC 811) und zugleich Hochkapazitäts-Anoden (Si/C mit mehr als 5 Prozent Si-Anteil) produziert. Bis dahin sind Automobilisten zudem an Zulieferverträge gebunden und werden erst sukzessive diese neuen, optimierten Zellen in den Elektrofahrzeugen verbauen können. Daher unterstellen die unteren Grenzen der Energiedichten (Wh/kg, Wh/l) bei den Zellformaten diese oben genannten Materialkombinationen und geben Mindestwerte für die am Markt verfügbaren und in Elektroautos verbauten Zellen an.

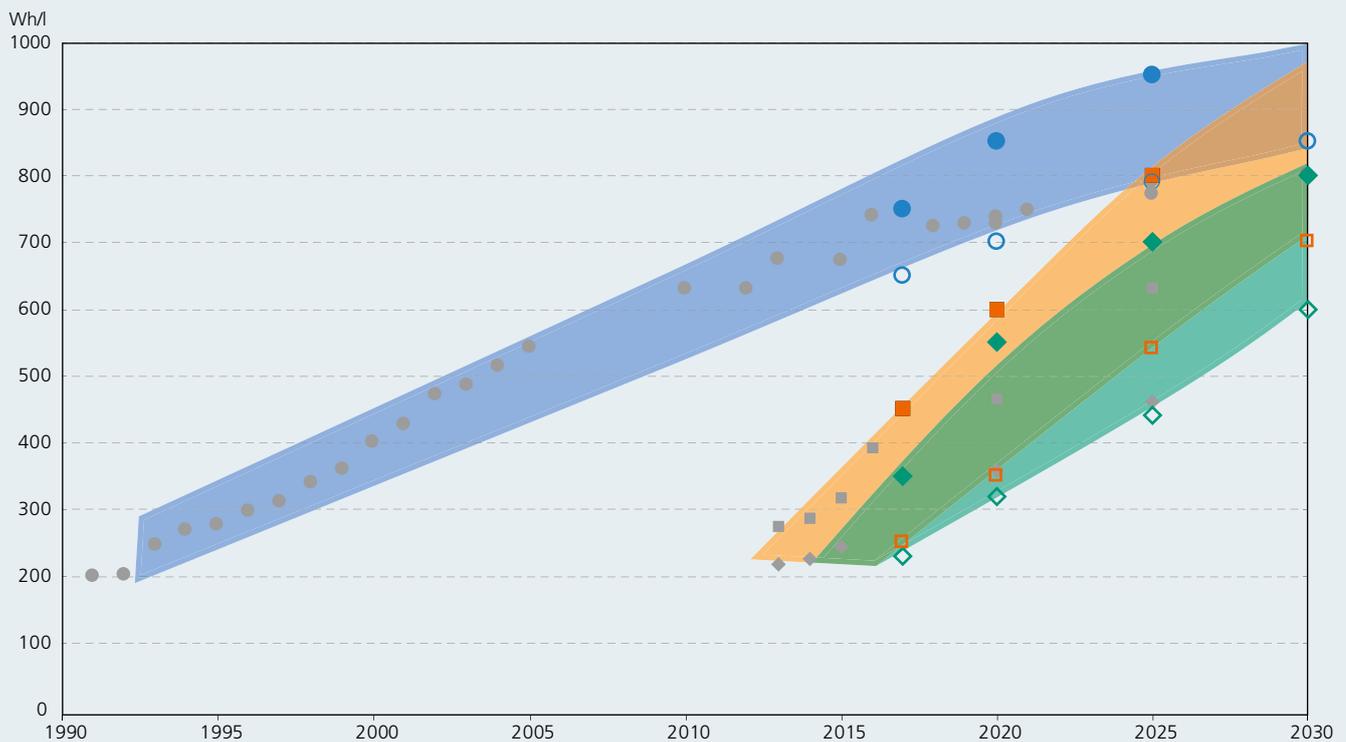
Demgegenüber ergeben sich bei Berücksichtigung ausschließlich der genannten Aktivmaterialien die entsprechenden oberen Grenzen der Energiedichten. Aus Literaturangaben und Marktprognosen²² lassen sich Angaben und Prognosen finden, welche innerhalb dieser unteren und oberen Grenzen liegen und jeweils den Einsatz von Blends bzw. die Verwendung ausschließlich der Hochenergie-Aktivmaterialien annehmen. Neben der spezifischen Kapazität der Aktivmaterialien stellen aber auch die Porosität, Schichtdicken bis hin zu Format-relevanten Faktoren (z. B. Zelldesign, Totvolumen) Einflussfaktoren dar. Die oberen Grenzen orientieren sich daher neben aktuellen Marktstudien auch an eigenen Berechnungen der Fraunhofer-Allianz Batterien (Hettesheimer et al. 2017).²³

In diesen Berechnungen wird von einer konsequenten Umsetzung von Material- und Prozessinnovationen ausgegangen, wie auch in der hier vorliegenden Hochenergie-Roadmap 2030+ angenommen wird²⁴, allerdings gehen wir hier davon aus, dass aufgrund bestehender Lieferverträge die verbesserten Hochenergie-Batterien erst einige Jahre später im Markt bzw. in Elektrofahrzeugen verbaut sein werden.

Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte von LiB-Zellen nach Zellformaten (in Wh/kg)²⁵



Entwicklung der volumetrischen Energiedichte von LiB-Zellen nach Zellformaten (in Wh/l)²⁶



ANFORDERUNGEN AN LEISTUNGSPARAMETER KÜNFTIGER HOCHENERGIE-BATTERIEN (MODUL/SYSTEM)

Während sich die Vorstellungen der Zellhersteller und Automobilisten mit Blick auf die Weiterentwicklung der eingesetzten Zellchemien für Hochenergie-Batterien in den letzten Jahren konsolidiert haben, ko-existieren die unterschiedlichen Zellformate weiterhin. Dies liegt darin begründet, dass mit der Auswahl eines Zellformats mehrere für OEM relevante Aspekte verbunden sind, wie etwa die im System bzw. bei einer anwendungsspezifischen Auslegung erreichbare Energiedichte, die geometrischen Abmessungen und damit Integrationsmöglichkeiten der Zellen in Module, die Wärmeentwicklung und auch Sicherheit der Zellen und der Bedarf eines Thermomanagements bis hin zu Sicherheitsmaßnahmen bis zur Systemebene sowie die Kosten der Zell-, Modulherstellung und Systemauslegung.

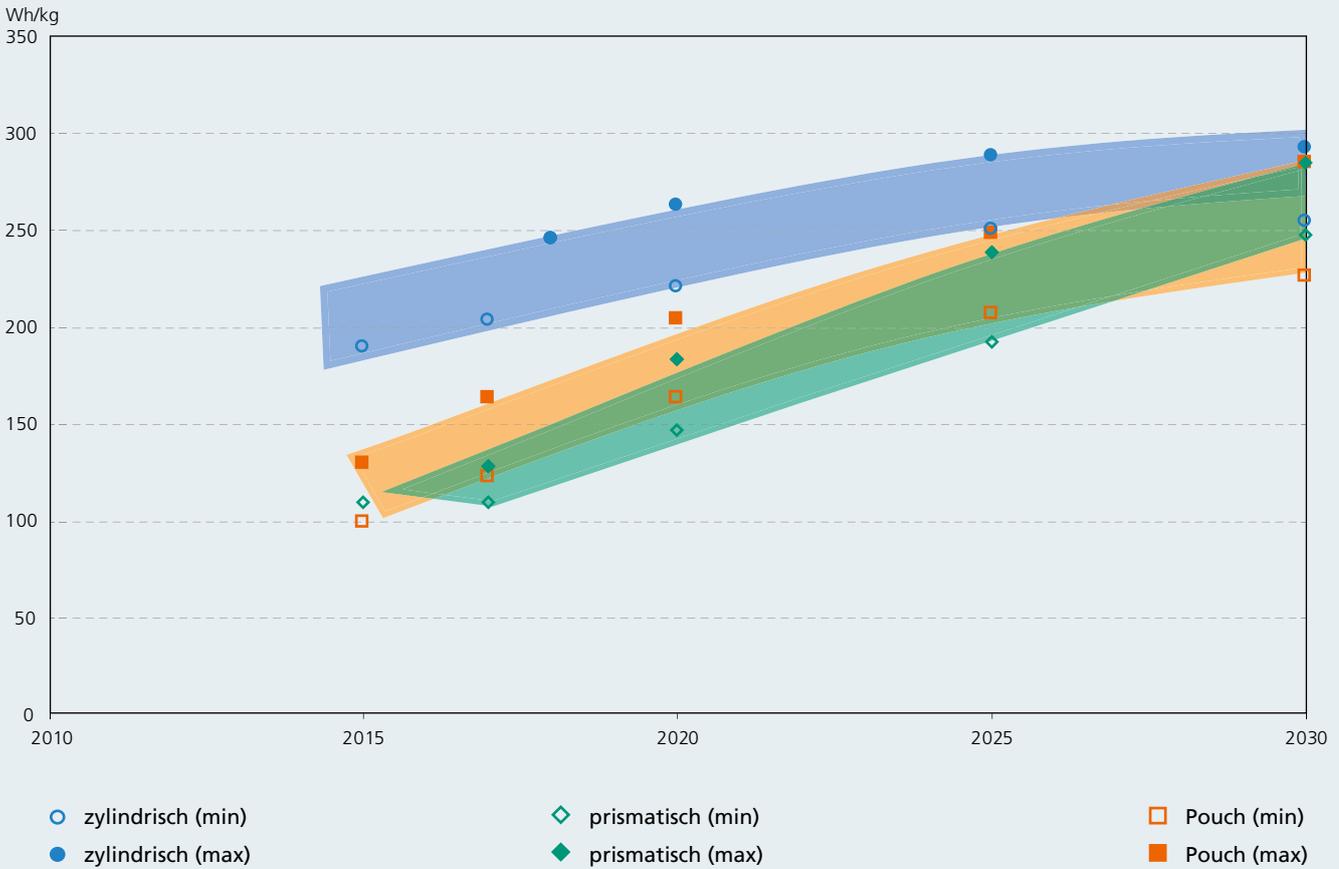
Entwicklung der Energiedichten auf Modulebene

Eine Betrachtung der gravimetrischen und volumetrischen Energiedichten auf Modulebene zeigt dabei, dass sich die zuvor auf Zellebene identifizierten und errechneten Energiedichten auf der Modulebene weiter angleichen. Im Gegensatz zu dem in Hettseimer et al. 2017²⁷ verfolgten Ansatz durch die Vorgabe einer definierten Modulabmessung legen wir an dieser Stelle beispielhaft die Energiedichten auf Zell- und Modulebene von Batterien am Markt befindlicher Elektroautos zugrunde: Für zylindrische Zellen das Model S von Tesla mit heute noch 18650er-Zellen der Zellchemie NCA/Graphit von Panasonic, für prismatische Zellen den BMW i3 mit Samsung-Zellen der Zellchemie NMC/Graphit und für Pouch-Zellen die Modelle Renault ZOE mit Zellen der Chemie NMC/Graphit von LG Chem sowie Nissan Leaf mit Zellen der Chemie LMO+LNO/Graphit von AESC (Joint Venture NEC und Nissan).²⁸

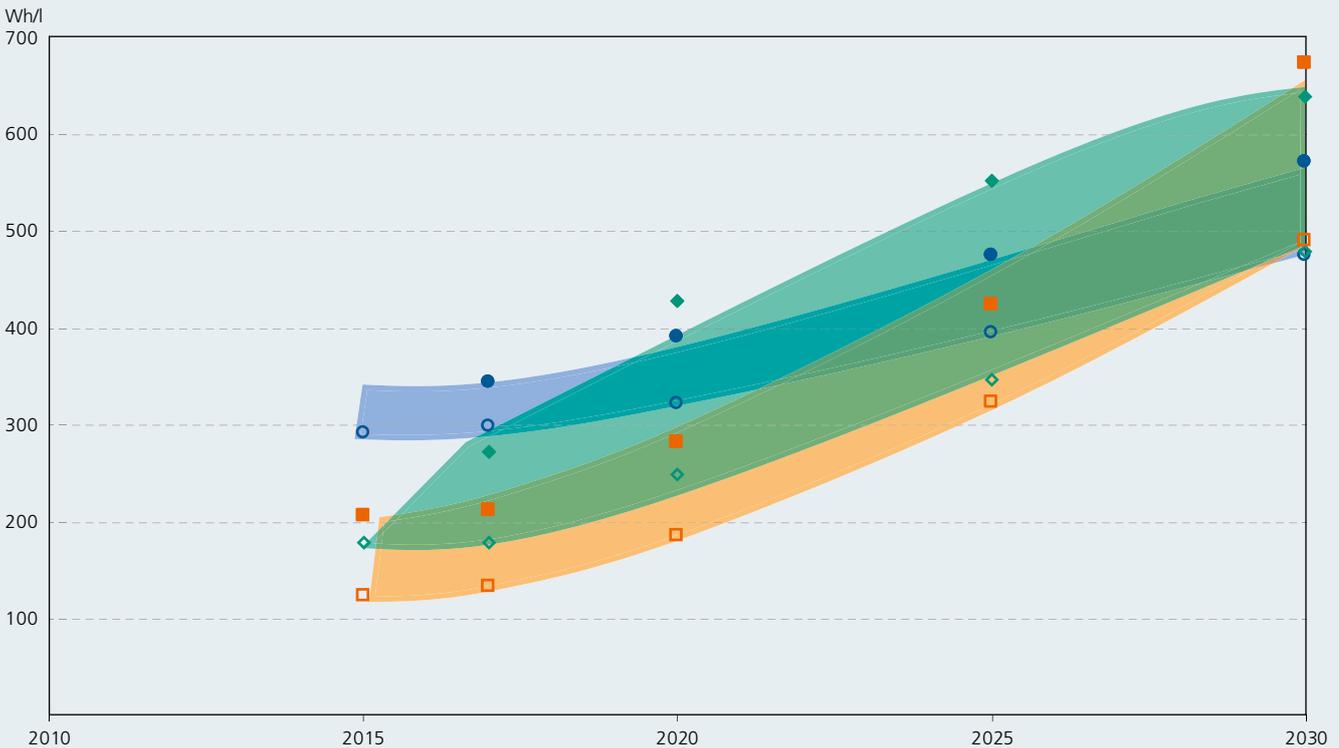
Für die Umrechnung der gravimetrischen Energiedichten von Zell- auf Modulebene ergibt sich ein Verlust von rd. 15 Prozent bei zylindrischen, 8 Prozent bei prismatischen und 16 bis 18 Prozent bei Pouch-Zellen. Bei prismatischen Zellen ist bzgl. Sicherheit und Thermomanagement weniger Aufwand und damit Gewicht auf Modulebene zu berücksichtigen. Ebenso gleicht das prismatische Zellformat bzgl. der volumetrischen Energiedichte die Nachteile auf der Zellebene durch den vorteilhafteren Formfaktor und geringeren Sicherheits- sowie Kühlaufwand aus. So verliert die prismatische Zelle auf Modulebene etwa 20 bis 22 Prozent, die Pouch-Zelle etwa 30 bis 50 Prozent und die zylindrische Zelle rund 50 Prozent an volumetrischer Energiedichte.

Durch die größeren noch zu realisierenden Entwicklungspotenziale der prismatischen und Pouch-Zellen dürften sich daher langfristig großformatige LIB-Zellen in Elektrofahrzeugen durchsetzen. Jedoch hängt es letztlich stark von individuellen anwendungsspezifischen Anforderungen ab, für welches Zellformat sich ein OEM bzw. generell ein Systemintegrator entscheiden wird. Dies bringt aber auch mit sich, dass eine Systemauslegung mit einem gegebenen Format anschließend längerfristig auf dieses Format abgestimmt und davon abhängig ist.

Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte von LiB-Modulen bei Nutzung unterschiedlicher Zellformate (in Wh/kg)



Entwicklung der volumetrischen Energiedichte von LiB-Modulen bei Nutzung unterschiedlicher Zellformate (in Wh/l)



ROADMAP ERKLÄRUNG

Die Roadmap Hochenergie-Batterien 2030+ identifiziert und benennt für den Zeitraum kurzfristig (bis 2020), mittelfristig (bis 2025) sowie langfristig (2030 und 2030+) insgesamt 25 FuE-Herausforderungen bzw. Lösungsansätze vom Material und der Prozesstechnik über Zellkomponenten bis hin zum Gesamtsystem (S. 22–23). Sie ist das Ergebnis eines Workshops mit Batterieexperten vom 20.6.2017 in Frankfurt am Main sowie ergänzenden Interviews und eigenen Recherchen des Fraunhofer ISI. Dabei werden mit Blick auf die zuvor definierten Prämissen (Anwendungskontext: BEV mit 60–80 kWh, 1 C Laderate, 1000 Zyklen, 8–10 Jahre Lebensdauer)²⁹ sowie die geforderten Entwicklungen der Leistungsparameter und Kosten (in der Roadmap-Grafik auf Zellebene für die Formate zylindrisch, prismatisch und Pouch angegeben) die jeweiligen Lösungsansätze detailliert in Steckbriefen diskutiert und unter FuE-Herausforderungen in einem Aufwand/Nachteil vs. Nutzen/Vorteil-Diagramm vergleichend gegenübergestellt (Kompositindikator). In der Roadmap-Grafik sind die Lösungsansätze zeitlich verortet und Beziehungen zwischen diesen aufgezeigt. Die zeitliche Verortung der jeweiligen Ansätze in der Roadmap kann als Zeitpunkt ihres Markteintritts interpretiert werden, d. h. dem Moment, zu dem die jeweilige Lösung im Gesamtsystem-Batterie in Elektrofahrzeugen auf den Markt kommen dürfte. Dabei gilt in der Regel, dass Komponenten und Zellen erst nach einer Bemusterung durch OEM mit einigen Jahren Verzug in die Fahrzeugintegration gelangen. Die Herausforderungen müssen daher bereits entsprechend früher gelöst sein.

So zeigt sich für die Technologieentwicklung der Hochenergie-Batterien, ausgehend von am Markt etablierten und bereits in Fahrzeugen integrierten Lithium-Ionen-Batterien, ein sukzessiver Wechsel der Zellkomponenten hin zu Hochenergiematerialien (lithiumbasiert) und schließlich Feststoffbatterien mit Li-Metall-Anoden und Hochenergiekathoden. Die durchgezogenen Pfeile deuten dabei jeweils an, dass eine Komponente oder Zelltechnologie nicht durch eine andere ersetzt wird, sondern diese jeweils ausreifen, also optimiert werden, und in den Anwendungen diffundieren. Es ergibt sich also eine evolutionäre Weiterentwicklung und Koexistenz lithiumbasierter Batterietechnologien.

FuE-Herausforderungen im Bereich der Komponenten

Kathodenseitig befinden sich nickelreiche Materialien (NMC 811) aktuell in der Qualifikation für Elektrofahrzeuge, welche 2020 auf die Straße kommen. Höhere Ni-Anteile sind schwierig in Bezug auf die Sicherheit und Herstellbarkeit. Der Markteintritt von Hochenergie-NMC könnte unter der Voraussetzung, dass die Elektrolytverfügbarkeit und Herausforderung bzgl. der Lebensdauer überwunden werden in etwa ab dem Jahr 2025 erfolgen. Bei den Hochvolt-Spinellen bestehen noch Herausforderungen bezüglich der Elektrolytstabilität und des Mn-Leaching. Trotz Preisvorteilen durch den Verzicht auf Kobalt und höheren Spannungen gegenüber Standard-NMC (622) kann die Energiedichte allerdings nicht auf das Niveau von HE-NMC gesteigert werden. Parallel wird bereits heute eine Verbesserung der Struktur und Schichtdicke vorgenommen, welche auch weiterhin kontinuierlich über die Zeit erfolgen wird, während die wässrige Prozessierung noch ein Forschungsthema darstellt. Produktionstechnisch wären mit den Ansätzen geringe Anpassungen verbunden.

Anodenseitig wird heute Graphit verwendet und auch in absehbarer Zukunft eine Rolle spielen. Die Strukturdicke wird dabei immer an das maximal mögliche Optimum angepasst werden. Bzgl. Si/C-Kompositen besteht der heutige Stand aus der Beimischung von 2 bis maximal 5 Prozent Siliciumoxid in Graphit. Zwischen 2020 und 2025 könnte Kohlenstoff-Silicium (nano) mit einem Anteil von 5 Prozent auf den Markt kommen. Stand heute ist dieses noch nicht in der Qualifikation. Der Silicium-Anteil könnte sukzessive gesteigert werden, abhängig von Entwicklungen auf Seiten der Kathode, die z. B. Effizienz- oder Summierungsverluste zulassen. Langfristig dürften Materialien mit einem Anteil von bis zu 20 Prozent verfügbar sein. Ein weiterer Bedarf besteht in der Entwicklung geeigneter Elektrolyte. Ein anderer Ansatz, der ebenfalls in diesem langfristigen Zeitrahmen relevant werden könnte, ist reines Nano-Silicium.

FuE-Herausforderungen für Feststoffbatterien

Die Entwicklungen hin zu Li-Metall-Anoden gehen mit der Entwicklung der Feststoffbatterien (mit polymeren-, hybriden und keramischen Festelektrolyten) einher. Ziel der Technologieentwicklung sind Festkörperbatterien mit Li-Metall-Anode und einer sehr dünnen Elektrolytschicht, was hohe Energiedichten ermöglicht. Viele der Sicherheitsrisiken in Lithium-Ionen-Batterien gehen von der Verwendung flüssiger, leicht entzündlicher oder explosiver Elektrolyte aus. Auch materialspezifische Beschränkungen, wie die Löslichkeit verschiedener Kationen oder die Begrenzung des für elektrochemische Reaktionen zugänglichen Spannungsfensters, sind mit den Eigenschaften von für Elektrolyte verwendeten organischen Lösungsmitteln verknüpft. Die Nutzung von Feststoffelektrolyten und damit die Ermöglichung von Feststoffbatterien kann die genannten Limitierungen durchbrechen und darüber hinaus auch potenziell Leistungsparameter der Batterien verbessern.^{30, 31, 32} Bzgl. der Feststoffbatterien gilt es aber auch zu bedenken, dass aufgrund der noch zu lösenden produktionstechnischen Fragen Lieferstrukturen und Prozesse zuerst noch aufgebaut werden müssen. Vor dem Einsatz in Elektrofahrzeugen könnte ggf. zunächst ein Einsatz im Konsumermarkt (3C) erfolgen und erst anschließend die Übertragung ins Fahrzeug. Zudem werden für den Masseneinsatz in Elektroautos eher hybride und keramische Feststoffbatterien als geeignete Lösungen eingeschätzt, polymere Feststoffbatterien werden eher in Spezialfahrzeugen gesehen. Somit dürften sich Feststoffsysteme in EV-Anwendungen erst ab 2030 etablieren und dann im Markt diffundieren.

FuE-Herausforderungen auf Zellebene

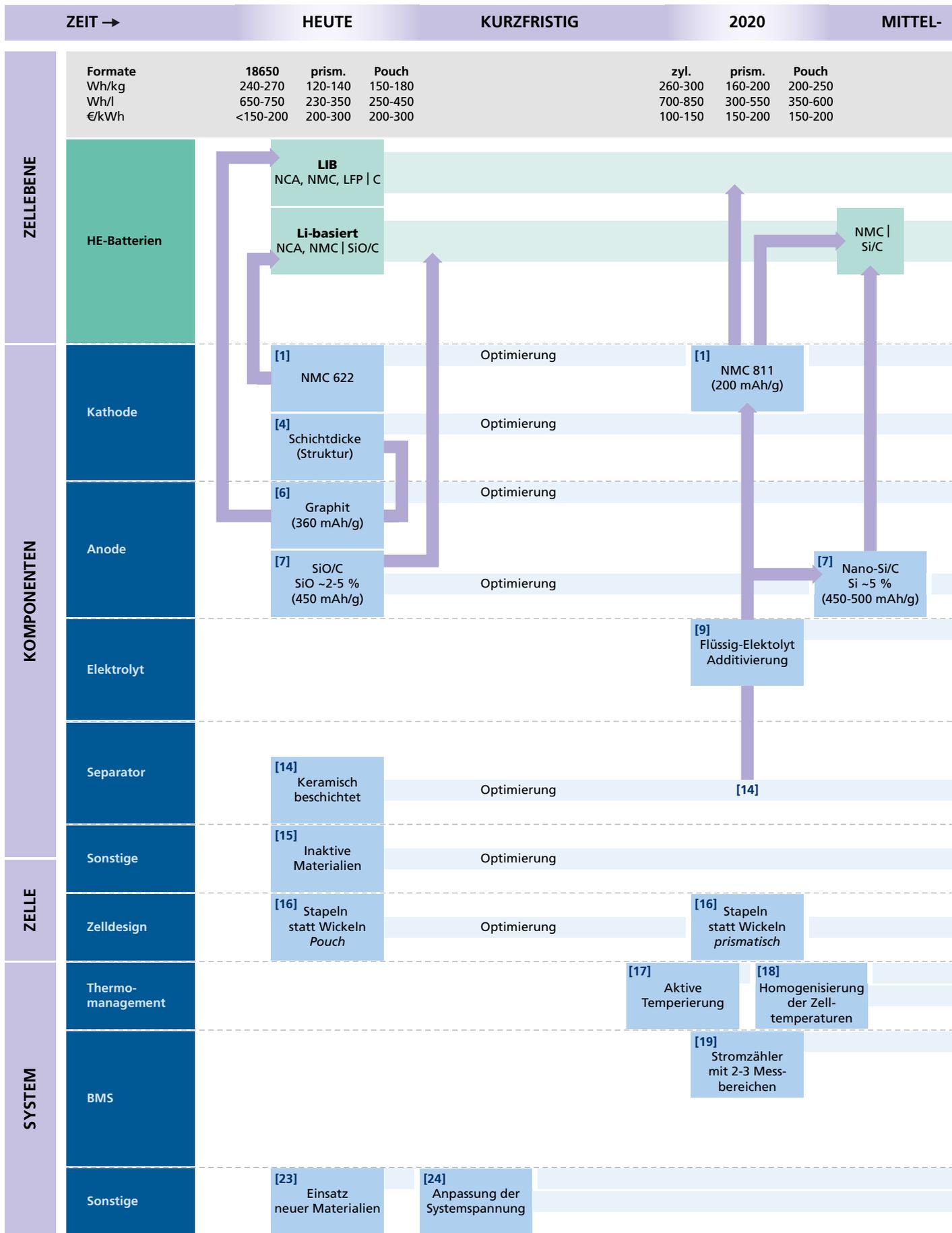
Neben den Ansätzen der Material-/Komponentenoptimierung verfolgt der Ansatz des Stapelns das Ziel, den Füllgrad durch die Reduktion des Totvolumens im Zellgehäuse zu erhöhen und damit das Zelldesign zu optimieren. Der Füllgrad ist beim Wickeln z. B. aufgrund der dabei entstehenden Radien vergleichsweise geringer. Der Stapelvorgang ist dabei vor allem für prismatische und Pouch-Zellen geeignet.

FuE-Herausforderungen auf Systemebene

Auf der Systemebene betreffen die FuE-Herausforderungen im Feld des Thermomanagements das Schnellladen mit gleichzeitiger Optimierung der Lebensdauer und die Homogenisierung der Temperatur im Batteriesystem über die Betriebszeit. Der Fokus der Ziele im Bereich Thermomanagement liegt somit auf einer Steigerung bzw. dem Erhalt der Lebensdauer, insbesondere wenn die Batterie schnell geladen wird und somit hohe Ströme und Temperaturen im Batteriesystem entstehen.

Die Aufgabe des Batteriemanagementsystems (BMS) liegt im intelligenten und optimierten Betrieb der Batterie, wodurch Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Batteriesystems optimiert werden müssen. Aus diesem Grund sind in den einzelnen Batteriemodulen diverse Sensoren zur Temperatur-, Spannungs- und Strommessung eingebracht. Auf dieser Grundlage sind daher vier FuE-Herausforderungen von besonderer Relevanz für das BMS: Eine Gesamtstrommessung mit zwei bis drei verschiedenen physikalischen Messbereichen, die sensorlose Temperaturbestimmung aller Batteriezellen, die Abstimmung der Spezifikationen für die im automobilen als auch im stationären Bereich eingesetzten Elektronikkomponenten und die Online elektrochemische Impedanzspektroskopie.

Das Gehäuse des Batteriesystems umfasst und schützt die innenliegenden Komponenten des Batteriesystems und kann auch Teil der Fahrzeugkarrosserie bzw. -chassis sein. FuE-Herausforderungen in diesem Bereich stellen den Einsatz neuer Materialien dar, um das Gehäuse leichter oder volumetrisch kleiner zu gestalten, sowie die konstruktive und werkstoffseitige Optimierung der Battery Junction Box, durch welche das gleiche Ziel verfolgt wird.



FuE-HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE HOCHENERGIE-BATTERIEENTWICKLUNG

Kompositindikator (Material bis Zelle)

Unter Einbezug der in den Steckbriefen (S. 30–61) vorgenommenen Bewertungen durch Batterie-Experten für die Herausforderungen [1] bis [16] wurde ein zweidimensionaler Indikator (I) erstellt, welcher sowohl das Potenzial einer Technologie als auch die mit ihr verbundenen Herausforderungen beschreiben soll.

Vorteil/Nutzen (VN): Diese Dimension kombiniert (1) die intrinsischen Vorteile des jeweiligen Lösungsansatzes und damit vorteilhafte technische Eigenschaften, (2) die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands/Europas bzgl. des Ansatzes, z. B. durch ansässige Hersteller, (3) die Bedeutung für Deutschland/Europa, z. B. aufgrund FuE-Aktivitäten und Schwerpunkten und (4) die Marktnähe. Dabei erfolgt eine höhere Gewichtung der intrinsischen Vorteile nach folgender Formel:

$$I_{VN} = (3 \cdot I_{\text{Vorteil}} + I_{\text{Wettbewerb DE/EU}} + I_{\text{Bedeutung DE/EU}} + I_{\text{Marktnähe}}) / 6$$

Nachteil/Aufwand (NA): Diese Dimension kombiniert (1) die intrinsischen Nachteile des jeweiligen Lösungsansatzes gegenüber etablierten Materialien, Komponenten oder Verfahren, (2) die Bewertung der technologischen Herausforderungen und damit des FuE-Aufwands, (3) die produktionstechnischen Herausforderungen bzw. Hürden sowie (4) den technischen Reifegrad und damit die noch zeitliche oder durch FuE-Förderung zu überwindende Barriere. Dabei erfolgt eine höhere Gewichtung der intrinsischen Nachteile, eine mittlere Gewichtung des Aufwands bei dem FuE-Aufwand und der Produzierbarkeit und eine geringere Gewichtung bzgl. des Reifegrads nach folgender Formel:

$$I_{NA} = (3 \cdot I_{\text{Nachteil}} + 2 \cdot I_{\text{FuE-Aufwand}} + 2 \cdot I_{\text{Produzierbarkeit}} + I_{\text{TRL}}) / 8$$

Die Einteilung des somit erstellten Kompositindikators erfolgt wie in den Spinnendiagrammen in den Steckbriefen in gering, mittel und hoch. Ein niedriger Wert bzgl. Nachteil/Aufwand weist auf prinzipiell direkt adaptierbare Herausforderungen und Technologien hin, welche ohne hohe Investitionsrisiken in die Produktion

überführt werden könnten. Ein hoher Wert bzgl. Vorteil/Nutzen weist auf die besondere Bedeutung und Alleinstellung eines Lösungsansatzes bzw. einer Technologie für eine technische Verbesserung und eine positive Auswirkung relevanter Batterieindustrien bzw. Akteure in Deutschland und Europa hin.

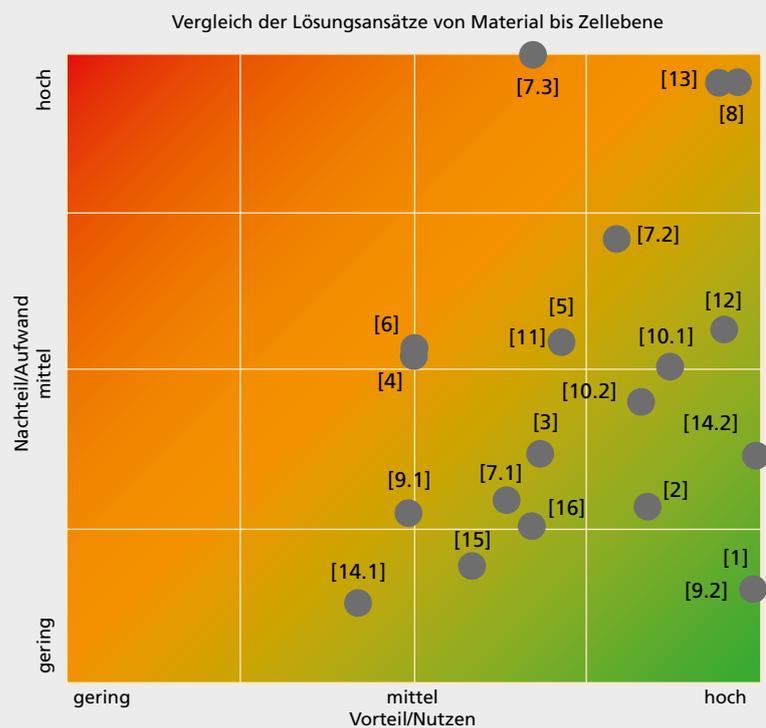
Vergleich der Lösungsansätze von Material und Zellebene

Der Vergleich der FuE-Herausforderungen [1] bis [16] für HE-Batterien vom Material bis zur Zelle untereinander zeigt, dass die Entwicklung der sehr marktnah eingestuften nickelreichen Kathoden [1] und die Elektrolyt-Additivierung [9] sehr hohe Vorteile bei der Weiterentwicklung der HE-Batterien aufweisen und mit geringem verbleibenden Aufwand verbunden sind. Für HE-NMC-Kathoden [2] steigt der Aufwand entsprechend und für HV-Kathoden [3] sinkt zudem der Vorteil für die HE-Batterieentwicklung.

Die unterschiedliche Positionierung der keramischen [14.2] und keramisch gecoateten [14.1] Separatoren ist durch die noch nicht skalierten Produktionsprozesse für keramische Separatoren (höherer Aufwand) begründet, bei welchen allerdings eine Führungsrolle deutscher Separatorhersteller im globalen Wettbewerb besteht. Diese besteht bei den keramisch gecoateten Separatoren nicht, für welche allerdings bereits konventionelle Prozesse skaliert sind.

Anodenseitig steigt mit dem Si-Anteil in Si/C-Kompositen [7.1, 7.2] entsprechend der FuE-Aufwand. Für reine Si-Anoden [7.3] stellt sich daher schließlich die Frage des verbleibenden Nutzens angesichts des sehr hohen Aufwands. Bzgl. weiterer Optimierung von Graphit-Anoden [6] und Schichtdicken [4] zeigt sich ein mittlerer Aufwand, jedoch ist auch der Vorteil und Nutzen mit Blick auf HE-Batterien begrenzt.

Kompositindikator von Material bis Zellebene



Kathode

- [1] Nickelreiche Materialien (NMC 622, 811)
- [2] Hochenergie-NMC
- [3] Hochvolt-Spinelle
- [4] Schichtdicke erhöhen (Struktur)
- [5] Wässrige Kathodenherstellung (FS-Anteil < 70 %)

Anode

- [6] Graphit
- [7] Si-Anteil (Nano-Si/C bis 5 % [7.1], 20 % [7.2], Si 100 % [7.3])
- [8] Li-Metall

Elektrolyt

- [9] Flüssigelektrolyt Additivierung (HV [9.1], Si-Anode [9.2])
- [10] Alternativer Flüssigelektrolyt (HV [10.1], nicht brennbar [10.2])
- [11] Festelektrolyt Polymer SPE/CPE
- [12] Festelektrolyt Hybrid
- [13] Festelektrolyt keramisch SCE

Separator

- [14] Separatoren (keramisch ge-coated [14.1], keramisch [14.2])

Sonstige

- [15] Inaktive Materialien optimieren

Zelldesign

- [16] Stapeln statt Wickeln

Li-Metall-Anoden [8] sind hingegen für die HE-Batterieentwicklung mit einem hohen Nutzen verbunden, aber auch mit einem hohen Aufwand. Entsprechend sind keramische aufgrund schwieriger Produzierbarkeit und mit deutlich höherem Aufwand als hybride [12] und polymere [11] Festelektrolyte eingestuft. Letztere zeichnen sich mit Blick auf EV-Anwendungen durch einen geringeren Nutzen aus.

Das Optimieren von inaktiven Materialien [15] und das Optimieren des Zelldesigns durch Stapeln von Pouch und prismatischen Zellen statt Wickeln [16] sind anwendungsnahe und kontinuierliche Themen mit vergleichbar geringem Aufwand, dabei aber vergleichbar hohem Nutzen für die Optimierung von HE-Batterien.

Kompositindikator (System)

Für die FuE-Herausforderungen bzw. Lösungsansätze [17] bis [25] auf Systemebene (vgl. Steckbriefe Seite 62–79) wird das gleiche Vorgehen bei der Bildung des Kompositindikators gewählt wie im Fall des Kompositindikators vom Material bis zur Zelle.

Vergleich der Lösungsansätze auf Systemebene

Der Vergleich der FuE-Herausforderungen [17] bis [25] für HE-Batterien auf Systemebene untereinander zeigt, dass im Bereich des Thermomanagements der Ansatz der Homogenisierung der Temperatur [18] und die damit verbesserte, gleichmäßige Zellalterung als besonders nutzbringend einzustufen ist, da zudem gleichzeitig der Aufwand gering ist. Hingegen ist der Aufwand der Temperierung der Batterie beim Schnellladen [17] trotz der sehr großen Vorteile und Bedeutung für die Elektromobilität ebenfalls sehr hoch, durch die erforderliche Kühlung des Systems, den Bedarf neue Produktionskonzepte zu entwickeln und schließlich die hohen Kosten für die Ladeinfrastruktur.

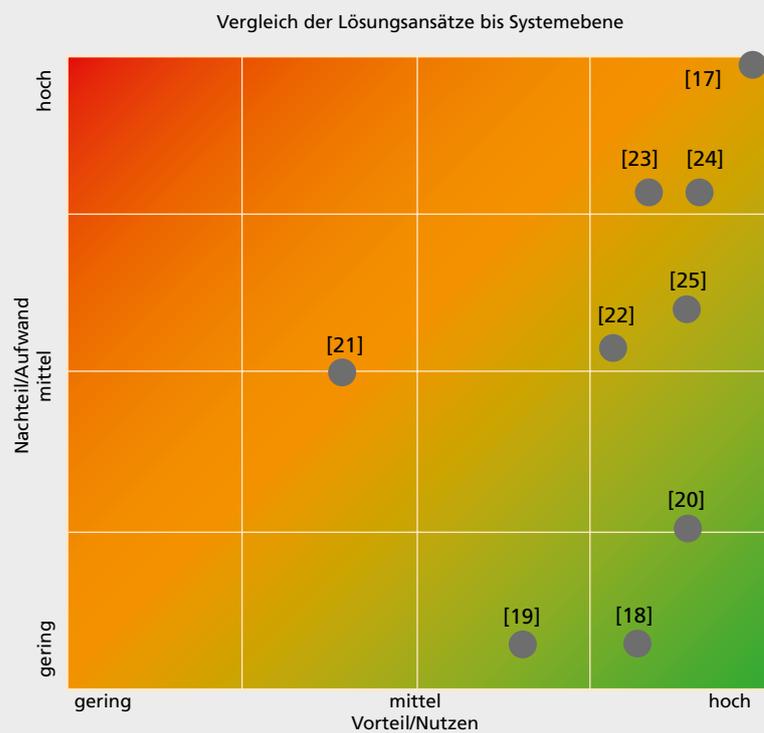
Mit Blick auf das Batteriemanagementsystem (BMS) bringen Stromzähler mit 2–3 physikalischen Messbereichen [19] einen mittleren bis hohen Nutzen bei geringem Aufwand. Durch den

Lösungsansatz kann die Messgenauigkeit erhöht, die Zustandsbestimmung der Batterie verbessert und schließlich die nutzbare Kapazität und Batteriealterung optimiert werden. Noch größer wird der Nutzen der sensorlosen Temperaturbestimmung [20] eingestuft. Die Ziele sind ebenso eine bessere Messgenauigkeit, nutzbare Kapazität und Batteriealterung, allerdings mit dem weiteren Vorteil einer besseren Batteriesystemüberwachung und ggf. Frühwarnung bei Fehlern. Jedoch ist der FuE-Aufwand auch etwas höher. Mit der Online elektrochemischen Impedanzspektroskopie [22], die ebenfalls auf die Zustandsbestimmung des Batteriesystems abzielt, wird noch mit einem größeren FuE-Aufwand und Dauer bis zur Marktreife gerechnet. Der Aufwand ist hierfür insgesamt höher und der Nutzen ähnlich wie bei der sensorlosen Temperaturbestimmung hoch. Die Vereinbarkeit von Elektronik für automotiv und stationäre Anwendungen [21] wird bei mittlerem Aufwand hingegen mit einem gering bis mittelgroßen Nutzen verbunden, da diese Lösung eng mit dem Gedanken bzw. Geschäftsmodell des 2nd Life verbunden und davon abhängig ist.

Im Bereich des Gehäuses und sonstiger Ansätze auf Batteriesystemebene zielt der Einsatz neuer Materialien [23] auf eine Reduktion des Overheads im Gewicht und Volumen ab, um schließlich die Reichweite des Elektrofahrzeugs zu erhöhen. Der Vorteil/Nutzen wird daher als hoch eingestuft, der Aufwand zur Materialentwicklung hängt aber im Einzelnen vom spezifischen Fall ab und kann im Mittel ebenso als hoch eingestuft werden. Mit der Optimierung der Battery Junction Box (BJB) [25] wird ebenfalls das Ziel verfolgt, Gewicht und Volumen zu reduzieren. Der Nutzen ist daher ebenso hoch und der mittlere bis hohe Aufwand insgesamt durch die nötigen FuE-Anstrengungen und benötigten neuen Produktionskonzepte begründet.

Die Anpassung der Batteriespannung für 800 V-Systeme ist mit einem sehr hohen FuE-Aufwand verbunden. Ein Teil der Komponenten muss erst noch entwickelt und die Sicherheit gewährleistet werden. Der Vorteil/Nutzen liegt dann jedoch in einer gesteigerten Performance und dem Komfort des Batteriesystems durch mehr Leistung und Bremskraft (relevant im High-Performance und Premium-Segment).

Kompositindikator auf Batteriesystemebene



Thermomanagement

[17] Temperierung der Batterie beim Schnellladen

[18] Homogenisierung der Temperatur

BMS

[19] Stromzähler mit 2–3 physikalischen Messbereichen

[20] Sensorlose Temperaturbestimmung

[21] Vereinbarkeit von Elektronik für automotiv und stationäre Anwendungen

[22] Online elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)

Gehäuse/Sonstige

[23] Einsatz neuer Materialien

[24] Veränderung der Systemspannung (800 V)

[25] Optimierung Battery Junction Box und neue Lösungen als Schutz

STECKBRIEFE HOCHENERGIE-BATTERIEN

FuE-Herausforderungen

Die 25 FuE-Herausforderungen [1] bis [25] zu Hochenergie-Batterien sind in den folgenden Steckbriefen vertieft charakterisiert. Dabei werden folgende Aspekte adressiert und im Text erläutert:

- Ziele und Vision
(adressierter Mehrwert für die Zelle und das System),
- Vorteile/Nachteile
(intrinsische Perspektive),
- Bottleneck (Red Brick Wall)/Lösungsansatz
(technische Perspektive),
- FuE-Aufwand/Produzierbarkeit
(Prozess-, Produktionsperspektive),
- Reifegrad/Marktnähe
(kommerzielle Perspektive),
- Format-Abhängigkeiten
(Rahmenbedingung und Anwendungsperspektive).

FuE-Roadmaps (normativ)

Weiterhin sind die Bottlenecks (sogenannte Red Brick Walls, technische Hürden) und entsprechende Ansätze zur Lösung der Bottlenecks in jeweiligen Roadmaps verortet, welche Teilauszüge der „Roadmap Hochenergie-Batterien 2030+“ auf Seite 22/23 darstellen. Mit dem Lösen des Bottlenecks werden die jeweiligen definierten Ziele erreicht.

Bewertung

In einem Spinnendiagramm werden auf einer Skala 1 bis 3

- Vorteile (gering, mittel, hoch),
- Nachteile (hoch, mittel, gering),
- Reifegrad (gering = Grundlagenforschung und entspricht TRL 1–3, mittel = angewandte Forschung und entspricht TRL 4–5, hoch = Pilot, Prototyp bzw. Marktreif und entspricht TRL 6–7 bzw. TRL 8–9)³³,
- FuE-Aufwand (hoch, mittel, gering),
- Produzierbarkeit (Umstellung, Anpassung, drop-in),
- Marktbedeutung (gering, mittel, hoch)³⁴

bewertet. Dabei sind die „semi-quantitativen“ Bewertungen so aufgetragen, dass ein größerer Wert jeweils als positiver einzustufen ist. Die Bewertung ist stets zwischen 1 und 3 normiert.

NUMMERIERUNG UND ZUORDNUNG DER STECKBRIEFE

ZELLE

Kathode

[1]	Nickelreiche Materialien (NMC 622, 811)	30
[2]	Hochenergie-NMC	32
[3]	Hochvolt-Spinelle	34
[4]	Schichtdicke (Struktur)	36
[5]	Wässrige Kathodenherstellung (FS-Anteil < 70 %)	38

Anode

[6]	Graphit	40
[7]	Si-Anteil erhöhen (Nano-Si/C 5 % [7.1], 20 % [7.2], Si 100 % [7.3])	42
[8]	Lithium-Metall	44

Elektrolyt

[9]	Flüssigelektrolyt Additivierung (HV [9.1], Si-Anode [9.2])	46
[10]	Alternativer Flüssigelektrolyt (HV [10.1], nicht brennbar [10.2])	48
[11]	Festelektrolyt Polymer SPE/CPE	50
[12]	Festelektrolyt hybrid	52
[13]	Festelektrolyt keramisch SCE	54

Separator

[14]	Separatoren (keramisch ge-coated [14.1], keramisch [14.2])	56
------	--	----

Sonstige Ansätze auf Zellebene

[15]	Inaktive Materialien optimieren	58
------	---------------------------------	----

Zelldesign

[16]	Stapeln statt Wickeln	60
------	-----------------------	----

SYSTEM

Thermomanagement

[17]	Temperierung der Batterie beim Schnellladen	62
[18]	Homogenisierung der Temperatur	64

Batteriemanagement

[19]	Stromzähler mit 2–3 physikalischen Messbereichen	66
[20]	Sensorlose Temperaturbestimmung	68
[21]	Vereinbarkeit von Elektronik für automotive und stationäre Anwendungen	70
[22]	Online elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)	72

Gehäuse/Sonstige Ansätze auf Batteriesystemebene

[23]	Einsatz neuer Materialien	74
[24]	Veränderung der Systemspannung (48V, 800V)	76
[25]	Optimierung Battery Junction Box und neue Lösungen als Schütze	78

KATHODE

[1] NICKELREICHE MATERIALIEN

Als nickelreiche Materialien werden NCA mit mehr als 80 % Nickel definiert, beziehungsweise NMC mit einer Zusammensetzung von 811.

Ziel und geeignete Zellformate

Das Ziel der Verwendung von nickelreichen Materialien liegt zum einen im Verzicht auf Co oder zumindest der Reduktion des Co-Anteils der Aktivmaterialien. Dies führt zu einer Senkung der Materialkosten und dem Ressourcenbedarf. Zum anderen bewirkt es auch eine Steigerung der Materialperformance, da mit einem gesteigerten Ni-Anteil die elektrische Leitfähigkeit und das Li⁺-Diffusionsvermögen steigen.

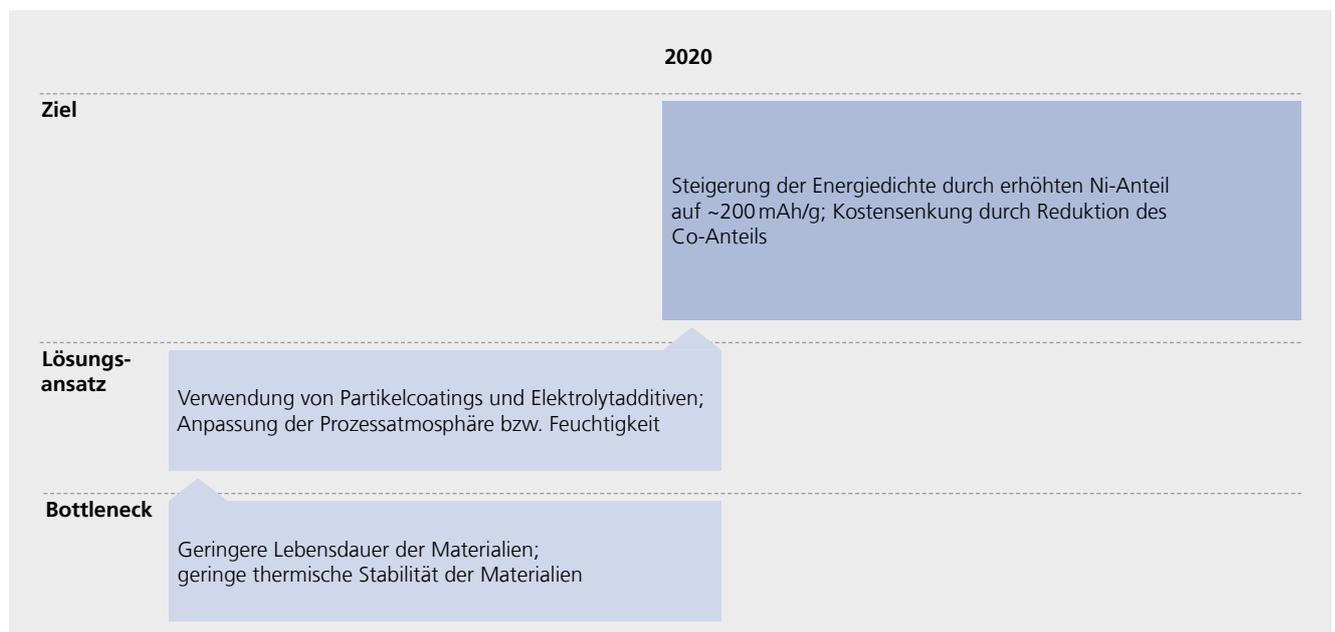
Bottlenecks und Lösungsansätze

Den zentralen Bottleneck zur Erreichung der Marktreife stellt eine Steigerung der Lebensdauer der Materialien dar. Dies ist jedoch mit einem niedrigen bis mittleren FuE-Aufwand zu bewältigen

(analog wie es bereits auch bei NMC-Materialien wie 532 oder 622 geschehen ist, die nun den Stand der Technik darstellen). Der Grund für die reduzierte Lebensdauer liegt darin, dass die Oberfläche der nickelreichen Materialien reaktiver gegenüber dem Elektrolyt ist. Eine Lösung für dieses Problem können z. B. Coatings sein. Zudem muss bei der Verarbeitung darauf geachtet werden, dass die Raumfeuchte < 50 % gehalten wird.

Vorteile und Nachteile

Sollten diese Bottlenecks jedoch überwunden werden, lassen sich durch nickelreiche Materialien extrem hohe Energiedichten realisieren, da diese Materialien bzw. Pulver theoretisch fast bis auf das Niveau von LCO verdichtet werden können. Nickelreiche Materialien haben im Vergleich zu NMC 111 eine höhere elektrische Leitfähigkeit. Dies bietet die Möglichkeit Leitadditive einzusparen und somit den inaktiven Anteil in der Kathode zu reduzieren bzw. auch weitere Kosten einzusparen. Insgesamt sind die Kosten wesentlich niedriger als bei Stand-der-Technik-Systemen oder bei NMC 622.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Energiedichte, Optimierung der Materialien, Kostenreduktion	Energiedichte, Kosten, Ni-Verfügbarkeit	Lebensdauer, Materialreaktivität, thermische Stabilität	Niedrig bis mittel	Prototyp/Demo (TRL 6–7)	Alle
	Feuchte- empfindlichkeit	Partikelcoatings, geeignete Elektrolyte (z. B. Additive)	Geringe Anpassungen	Kurz- bis mittelfristig	

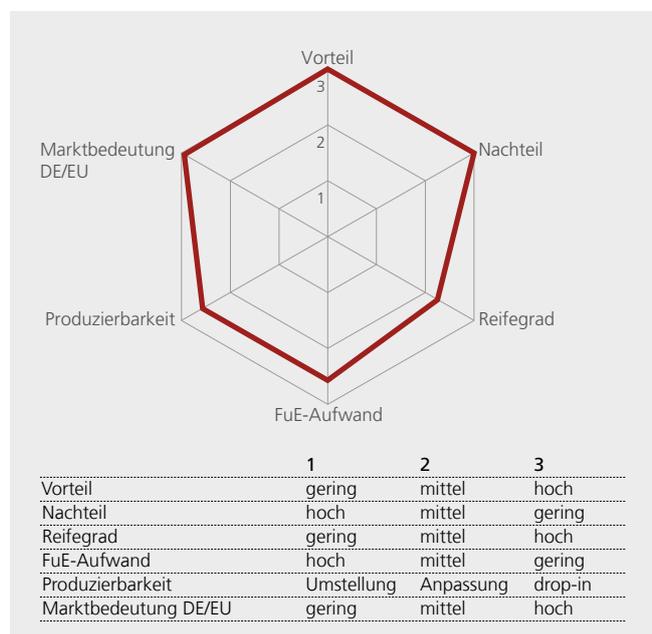
Weiterhin liefert der Ansatz einen Vorteil mit Blick auf die Ressourcenverfügbarkeit, insbesondere mit Blick auf Kobalt. Nachteilig ist dagegen die höhere Feuchteempfindlichkeit als bei NMC-Standardmaterialien. Diese ist jedoch immer noch auf einem handhabbaren Niveau, allerdings steigen die Produktionskosten.

Aufwand und Produzierbarkeit

Dieser Ansatz ist für alle Formate geeignet. Die Produzierbarkeit geht eher mit geringen Anpassungen einher.

Reifegrad und Markteintritt

Der Ansatz befindet sich derzeit noch im Bereich der Prototypen bis Demonstration. Erste Proben können jedoch bereits vom Kunden bemustert werden. Die Marktreife für nickelreiche Materialien (NMC 811) dürfte etwa um 2020 erreicht werden und anschließend die Anwendung in Elektroautos erfolgen.



KATHODE

[2] HOCHENERGIE-NMC

Bei Hochenergie-NMCs handelt es sich um lithiumreiche „integrierte“ Kompositmaterialien, welche als $y \times \text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-y) \times \text{LiMO}_2$ $M = (\text{Ni}, \text{Mn}, \text{Co})$ definiert werden können. Die Materialien bieten aufgrund eines vorteilhaften Verhältnisses von Lithium zu Übergangsmetall mit größer 1 eine theoretisch hohe spezifische Kapazität.

Ziel und geeignete Zellformate

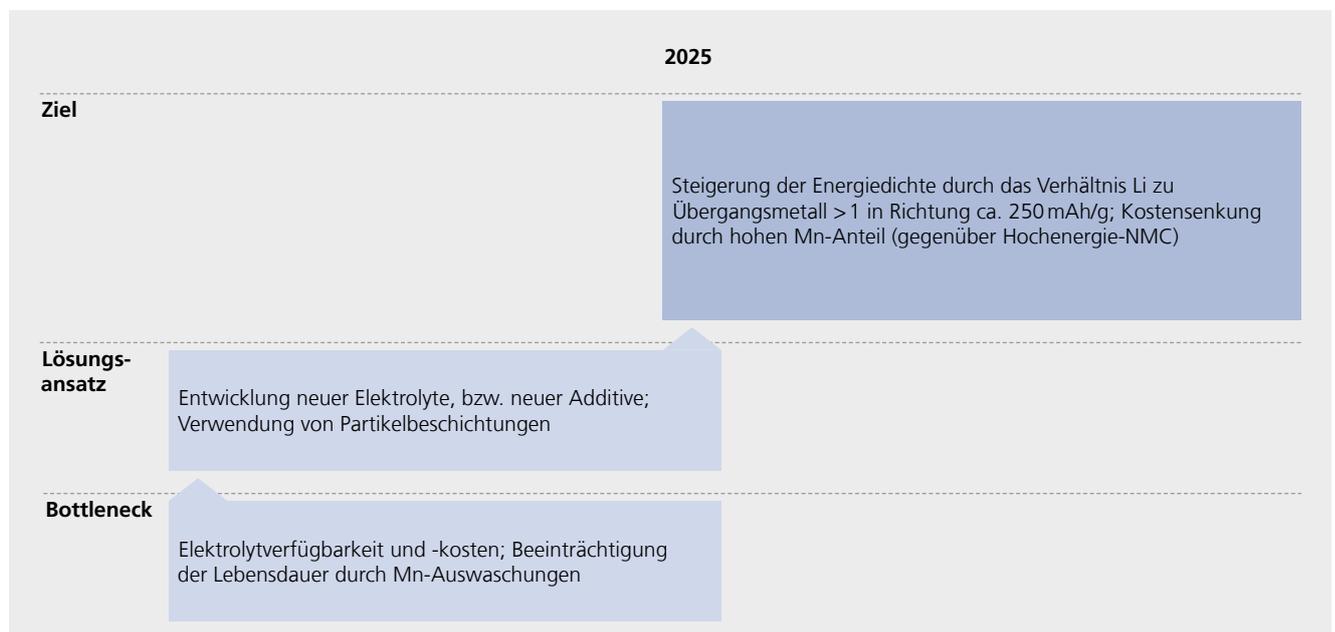
Praktisch werden zurzeit spezifische Kapazitäten von etwa 280 mAh/g erreicht. Die Verwendung von Hochenergie-NMC hat somit eine Steigerung der Energiedichte zum Ziel. Ferner hat Hochenergie-NMC aufgrund des hohen Mn-Anteils preislich einen Vorteil gegenüber nickelreichen Materialien und bietet somit zusätzlich ein Kostensenkungspotenzial. Das Zellformat spielt für die Verwendung von Hochenergie-NMC keine Rolle.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Bottlenecks bilden derzeit die Elektrolytverfügbarkeit sowie die Elektrolytkosten, die vergleichsweise hoch sind, da gängige Standardelektrolyte hier nicht mehr ausreichen. Weiterhin kann auch die Lebensdauer der Materialien durch Mn-Auswaschungen beeinträchtigt werden. Dieses scheidet sich in der Zelle ab und das Kathodenmaterial verliert an Performance. Partikelcoatings stellen hierbei eine Möglichkeit dar, die Auswaschung zu verhindern.

Vorteile und Nachteile

Sofern diese Bottlenecks gelöst werden können, ergibt sich auf Zellebene ein sehr hoher Kostenvorteil aufgrund des hohen Mn-Anteils. Zudem ist die Energiedichte besser als bei NMC111-Systemen, jedoch geringer als bei nickelreichen Materialien. Die Porosität der Pulver ist dagegen ähnlich, wobei die intrinsische Dichte geringer ist, woraus eine niedrigere Gesamtdichte im



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Energiedichte, Kostenreduktion	Kosten, Energiedichte	Elektrolyt- verfügbarkeit, Lebensdauer	Mittel	Angewandte Forschung bis Prototyp (TRL 4-7)	Alle
	Elektroden- balancierung, Produzierbarkeit	Entwicklung neuer Elektrolyte, bzw. neuer Additive, Partikelcoatings	Geringe Anpassungen	Mittel- bis langfristig	

Vergleich zu den nickelreichen Materialien resultiert. Somit ist Hochenergie-NMC in Bezug auf die Kosten sehr vorteilhaft, in Bezug auf hohe Energiedichten jedoch nicht die beste Lösung. Die Verwendung von Hochenergie-NMC hängt somit auch vom Anwendungsumfeld und dem verfügbaren Bauraum ab bzw. davon, wie sehr man auf die hohen Energiedichten angewiesen ist.

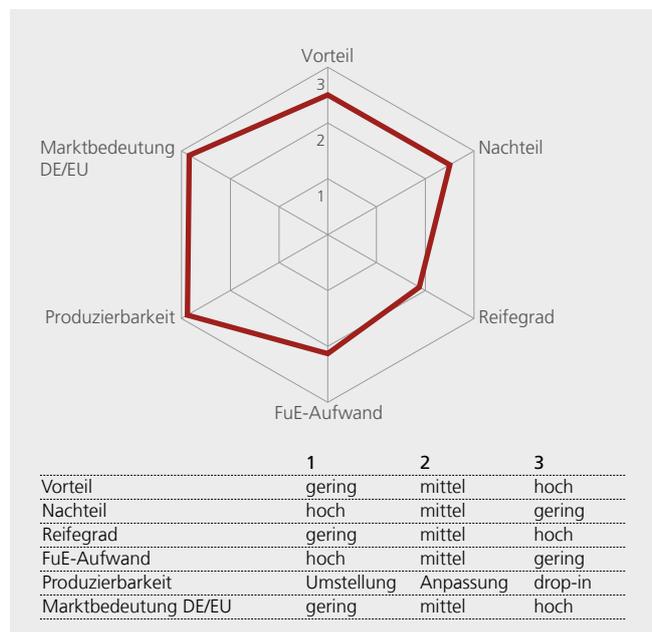
Abgesehen von dieser Einschränkung ist die Elektrodenbalancierung mit der Anode als problematisch anzusehen (unterschiedliche spezifische Kapazitäten von Kathode und Anode). Die Anode müsste entsprechend sehr dick ausgelegt werden, um das Lithium aus der Kathode komplett aufzunehmen. Dies führt jedoch wiederum zu einer Begrenzung der Performance und wirkt sich negativ auf die Produzierbarkeit aus. Dieser Aspekt kann jedoch wiederum durch die Verwendung von siliciumhaltigen Anoden weitestgehend ausgeglichen werden.

Aufwand und Produzierbarkeit

Für die Verwendung von HE-NMC ist noch ein höherer FuE-Aufwand zu betreiben bis die Marktreife letztlich erreicht wird. Dies betrifft auch die Produzierbarkeit, für die von einem geringen Aufwand ausgegangen werden kann.

Reifegrad und Markteintritt

Derzeit befinden sich die manganreichen Materialien noch im Bereich der angewandten Forschung bis hin zum Prototypen, evtl. auch schon bei der Kundenbemusterung. Der Markteintritt von Hochenergie-NMC könnte unter der Voraussetzung, dass alle Schwierigkeiten überwunden werden in etwa ab dem Jahr 2025 erfolgen.



KATHODE

[3] HOCHVOLT-SPINELLE

Hochvoltspinelle sind Lithium-Mangan-basierte Oxide ($\text{Li}(\text{Mn}, \text{M})_2\text{O}_4$ $M = (\text{Fe}, \text{Ni})$) mit einer kubischen Struktur. Als nickel-dotierte Oxide werden sie dabei zur Klasse der „5V“-Materialien gezählt (z. B. $\text{LiMn}_{1,5}\text{Ni}_{0,5}\text{O}_4$, 4,8V gegen Li/Li^+). Die Kapazität der Hochvoltspinelle liegt in etwa bei 140 mAh/g.

Ziel und geeignete Zellformate

Das Material ist vergleichsweise gut verfügbar und günstig, wodurch sich Kostenvorteile ergeben können. Auf Modulebene lässt sich mit einer kleineren Zellanzahl eine hohe Batteriespannung realisieren und somit die Kosten ebenfalls reduzieren und ggf. die Energiedichte steigern. Wie auch bei den bereits genannten Ansätzen ist auch der Einsatz von Hochvoltspinellen vom Zellformat unabhängig.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Herausforderungen auf dem Weg zur Marktreife betreffen insbesondere den Elektrolyten. Die Elektrodenmaterialien an sich sind stabil, der Elektrolyt ist es jedoch nicht und die Zersetzungsprodukte des Elektrolyten schädigen die Anode. Als zentraler Bottleneck sind daher die Elektrolytstabilität und das Mangan-Leaching zu sehen. Die Elektrolytinstabilität führt dazu, dass sich die Zersetzungsprodukte des Elektrolyten an Graphitanoden abscheiden und weiter reagieren. Dies führt zum letztendlich zum Zelltod.

Der Elektrolyt hat somit einen wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer der Zelle. State-of-the-art-Elektrolyte auf Carbonatbasis sind stabil bis etwa 4,5V gegen Li/Li^+ . Diese Stabilität muss somit zukünftig weiter erhöht werden, da z. B. HV-NMC eine Stabilität bis 5V gegen Li/Li^+ benötigt. Alternativ werden auch Beschichtungen für diese Aktivmaterialien entwickelt, um diese Nachteile zu kompensieren.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Energiedichte, Kostenreduktion	Kosten, Energiedichte	Elektrolytstabilität, Mn-Auswaschungen	Hoch	Angewandte Forschung (TRL 4-5)	Alle
	Verfügbarkeit von Elektrolyten, Separatorstabilität	Elektrolytentwicklung, bzw. Komponenten- wechsel, Partikel- beschichtung	Geringe Anpassungen	Mittel- bis langfristig	

Vorteile und Nachteile

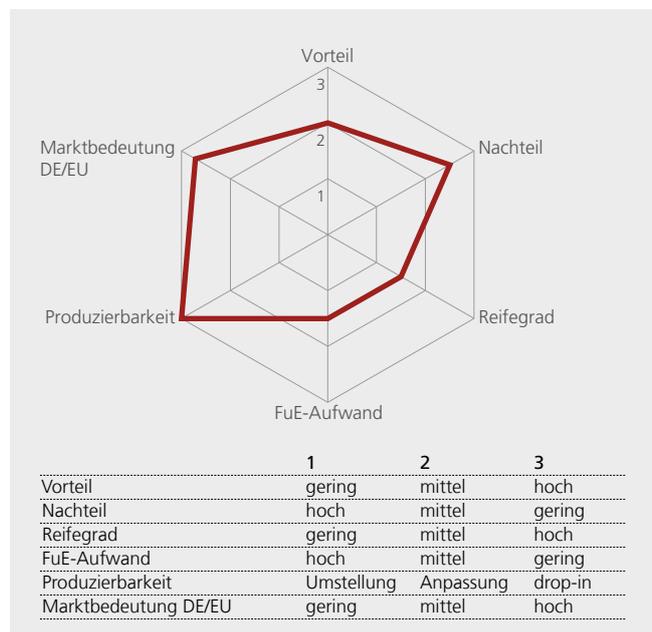
Ein wesentlicher Vorteil durch die Verwendung von Hochvolt-spinellen liegt in dem Preisvorteil der sich für das Kathodenmaterial aus dem Verzicht auf Kobalt und dem hohen Anteil an Mangan, in Verbindung mit der höheren mittleren Spannung gegenüber Standard-NMC ergibt. Zudem kann die Energiedichte aufgrund des möglichen hohen Potenzials gegenüber gängigen Anodenmaterialien gesteigert werden. Jedoch nicht auf das Niveau von nickelreichen Materialien. Der Nachteil bei der Verwendung von Hochvoltspinellen liegt in der Verfügbarkeit geeigneter Elektrolyte und der Separator-Stabilität.

Aufwand und Produzierbarkeit

Der FuE-Aufwand dieses Ansatzes ist als hoch einzustufen. Die Anpassungen zur Produzierbarkeit sind eher gering bzw. sogar drop-in-fähig.

Reifegrad und Markteintritt

Die HV-Technologie befindet sich derzeit im Bereich der angewandten Forschung. Der Markteintritt von Hochvoltspinellen könnte in etwa zwischen 2025 und 2030 erfolgen.



KATHODE

[4] SCHICHTDICKE (STRUKTUR)

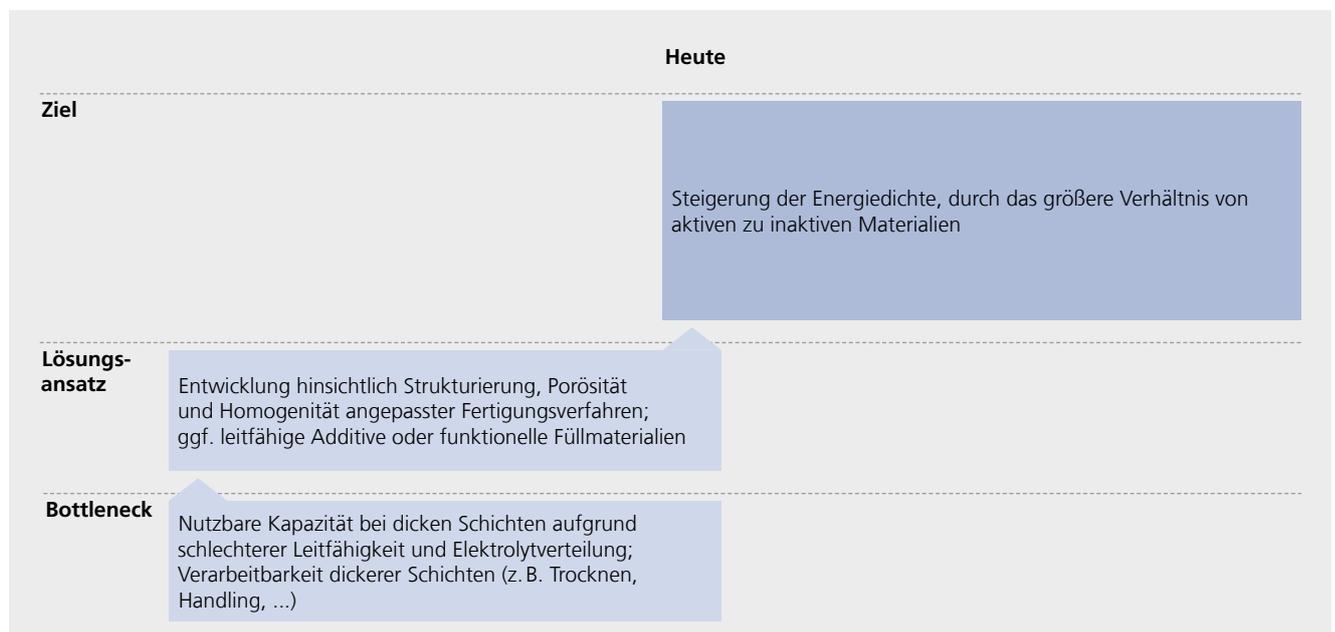
Bezüglich der Schichtdicke wird die Optimierung der Elektrode nicht aus der Rohstoffperspektive, sondern aus konzeptioneller Sicht, wie die Elektrode gestaltet ist, betrachtet. Die Ladung einer Kathode liegt derzeit bei etwa 40–100 Ah/m² (beidseitig auf Alu beschichtet). Die zentralen Einflussgrößen für eine Steigerung der Energiedichte sind dabei die Schichtdicke, die Porösität und die Tortuosität. Die Schichtdicke beeinflusst die Verarbeitbarkeit, Flexibilität, Stabilität und damit auch Lebensdauer der Zelle. Außerdem verschlechtern hohe Schichtdicken die thermische Leitfähigkeit der Elektrode. Es können passivierte (isolierte) Bereiche entstehen und zudem wird die Trocknung aufwändiger und langwieriger. Die Tortuosität kann durch eine entsprechende Mikrostrukturierung der Elektrode verändert werden. Die Porösität ist momentan noch schlechter als hexagonal dichteste Kugelpackung, während die Gesamtdichte bereits nahe an der Grenze ist, da auch weiterhin das Leitadditiv und der Binder benötigt werden.

Ziel und geeignete Zellformate

Das generelle Ziel einer erhöhten Schichtdicke der Aktivmaterialien liegt in der damit einhergehenden Steigerung der Energiedichte durch das größere Verhältnis von aktiven zu inaktiven Materialien. Der Ansatz erhöhter Schichtdicken ist prinzipiell für alle Zellformate geeignet.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Der bedeutsamste Bottleneck auf dem Weg zu einer erhöhten Schichtdicke liegt in der erschwerten Verarbeitbarkeit. Eine Erhöhung der Schichtdicke, um einige wenige Prozent mehr Energiedichte auf Systemebene zu erhalten, führt bereits zu einer starken Erhöhung des Aufwands. Entsprechend müssen hier weitere Entwicklungstätigkeiten im Bereich der Verarbeitbarkeit unternommen werden (z. B. in Bezug auf die Trocknung von dicken Schichten, Pulverbeschichtungsverfahren, das Handling der dickeren Elektrode etwa beim Wickeln durch die stärkeren Biegeradien, beim Befüllen, ...). Ein weiterer Bottleneck stellt zudem die nutzbare Kapazität bei dicken Schichten dar. Die Dicke



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Optimierung der Komponente und Energiedichte	Energiedichte	Verarbeitbarkeit (Trocknung, Handling, Befüllen) und verfügbare Kapazität	Hoch	Angewandte Forschung bis Prototyp (TRL 4–7)	Alle
	Leitfähigkeit, Prozessierbarkeit	Anpassung der Fertigungsprozesse	Geringe Anpassungen	Am Markt	

wirkt sich negativ auf die Leitfähigkeit und Elektrolytverteilung aus, wodurch es deutlich länger dauert, das Kathodenmaterial mit Lithium-Ionen zu versorgen oder diese abzutransportieren.

Vorteile und Nachteile

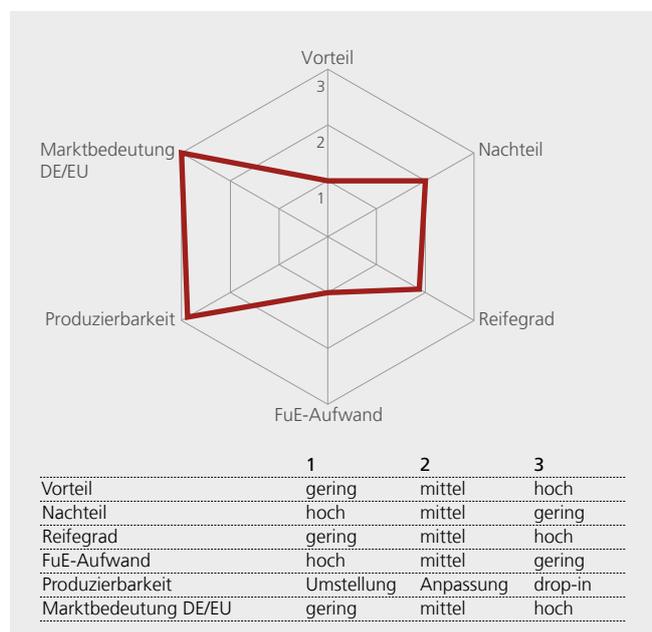
Der Vorteil liegt in der höheren Energiedichte, bedingt durch die Konfiguration der Elektroden und dem relativ geringeren Anteil an Inaktivmaterialien. Nachteilig ist dagegen die schlechtere Prozessierbarkeit aufgrund der verringerten mechanischen Flexibilität. Die geringere Leitfähigkeit dicker Materialschichten führt zu einer schlechteren Schnelladefähigkeit der Zellen. Aktivmaterialien mit erhöhter Schichtdicke befinden sich bereits auf dem Markt, wobei der Ansatz stetig weiterentwickelt wird.

Aufwand und Produzierbarkeit

Der Aufwand zur Optimierung der Schichtdicke ist als hoch anzusehen, die Anpassungen zur Produzierbarkeit als gering.

Reifegrad und Markteintritt

Die Reife ist zwischen der angewandten Forschung bis hin zum Prototypen zu sehen. Ansätze zur Optimierung der Schichtdicke sind bereits heute state-of-the-art und werden auch zukünftig weiter verfolgt und kontinuierlich verbessert werden.



KATHODE

[5] WÄSSRIGE KATHODEN-HERSTELLUNG (FS-ANTEIL < 70 %)

Die wässrige Kathodenherstellung beschreibt die Substitution organischer Lösungsmittel durch Wasser.

Ziel und geeignete Zellformate

Das Ziel der Verwendung wässriger Medien während der Elektrodenherstellung liegt zum einen darin die Kosten der Fertigung zu senken und zum anderen könnten LIBs durch den Verzicht auf organische Lösungsmittel deutlich umweltfreundlicher hergestellt werden. Die wässrige Kathodenherstellung ist dabei für alle Formate geeignet.

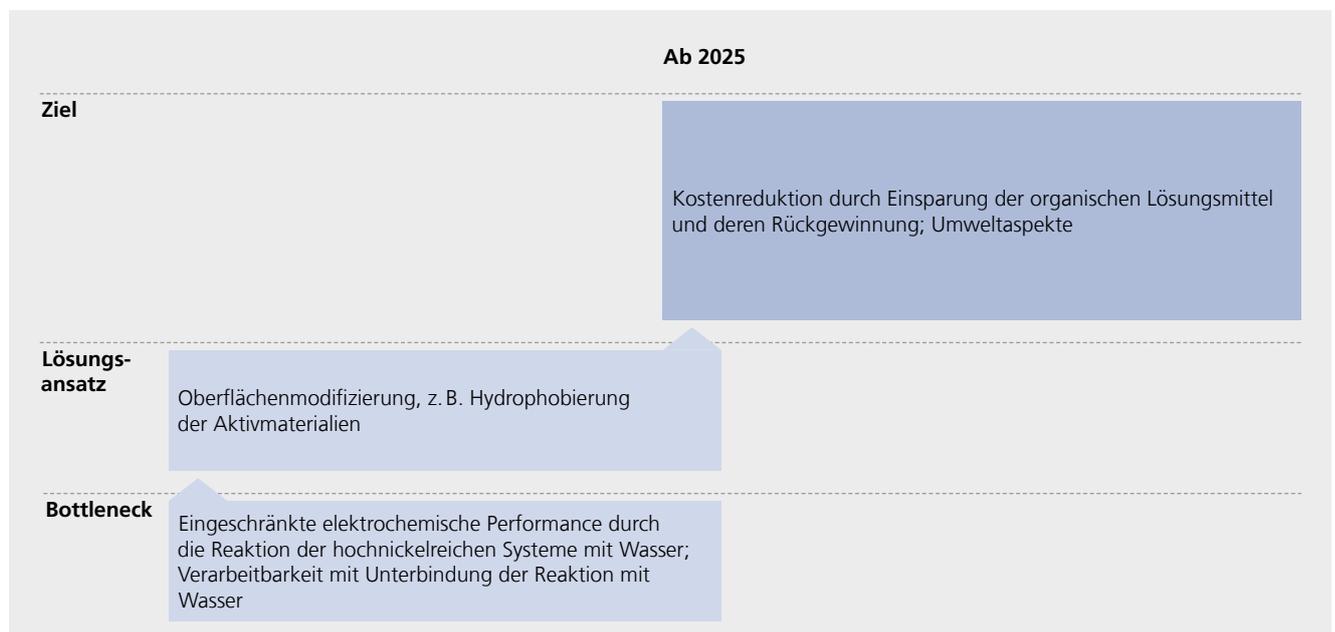
Bottlenecks und Lösungsansätze

Ein wesentlicher Bottleneck liegt in der Qualität wässrig hergestellter Elektroden/Zellen bzw. in deren elektrochemischer Performance. Viele der Zellkomponenten wie z.B. hochnickelreiche Systeme oder der Elektrolyt sind sehr empfindlich gegen-

über Wasser. Selbst kleine Restmengen im ppm Bereich können sich deutlich auf die Performance und Lebensdauer der Zellen auswirken. Auch die Verarbeitbarkeit kann derzeit noch als schwierig eingeschätzt werden, da noch keine entsprechende Prozessroute existiert, um das während der Verarbeitung zugeführte Wasser wieder vollständig aus den Elektroden herauströcknen zu können. Eine materialeitige Lösung wäre etwa die Hydrophobierung des Materials, was jedoch sehr aufwändig ist.

Vorteile und Nachteile

Der Vorteil einer wässrigen Kathodenherstellung liegt in der Reduktion der Kosten durch die Einsparung der organischen Lösungsmittel und deren Rückgewinnung sowie in den positiven Umweltaspekten, während der höhere Energieaufwand zur Trocknung und die Wassersensitivität verschiedener Aktivmaterialien einen Nachteil dieses Verfahrens darstellen. Insbesondere bei nickelreichen und lithiumreichen Materialien besteht die Gefahr der Auswaschung von Nickel und Lithium.



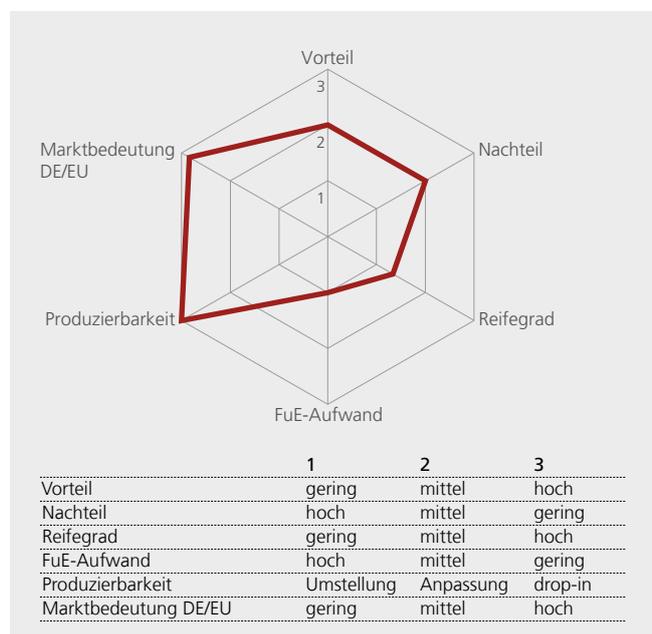
ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Kostenreduktion und Umweltaspekte	Kostenreduktion und Umweltaspekte	Qualität, Verarbeitbarkeit	Hoch	Grundlagenforschung (TRL1–3 oder höher)	Alle
	Energie zur Trocknung, Stabilität der AM	Oberflächen- modifizierung, Hydrophobierung der Aktivmaterialien	Geringe Anpassungen	Mittel- bis langfrisrig	

Aufwand und Produzierbarkeit

Der zu betreibende FuE-Aufwand im Bereich der wässrigen Kathodenherstellung kann als hoch angesehen werden. Die Anpassungen zur Produzierbarkeit dürften eher gering sein.

Reifegrad und Markteintritt

Ihre Reife lässt sich derzeit eher noch in der Grundlagenforschung verorten. Die wässrigen Binder sind somit noch ein Forschungsthema. Wenn materialseitige Probleme (wie z. B. Kathodenpulver oder Binder) gelöst sind, könnte eine Markteinführung jedoch ab 2025 möglich sein.



ANODE

[6] GRAPHIT

Natürliches und synthetisches Graphit stellen den Status quo als Anodenmaterial dar. Graphit hat eine spezifische Kapazität von ca. 360mAh/g.

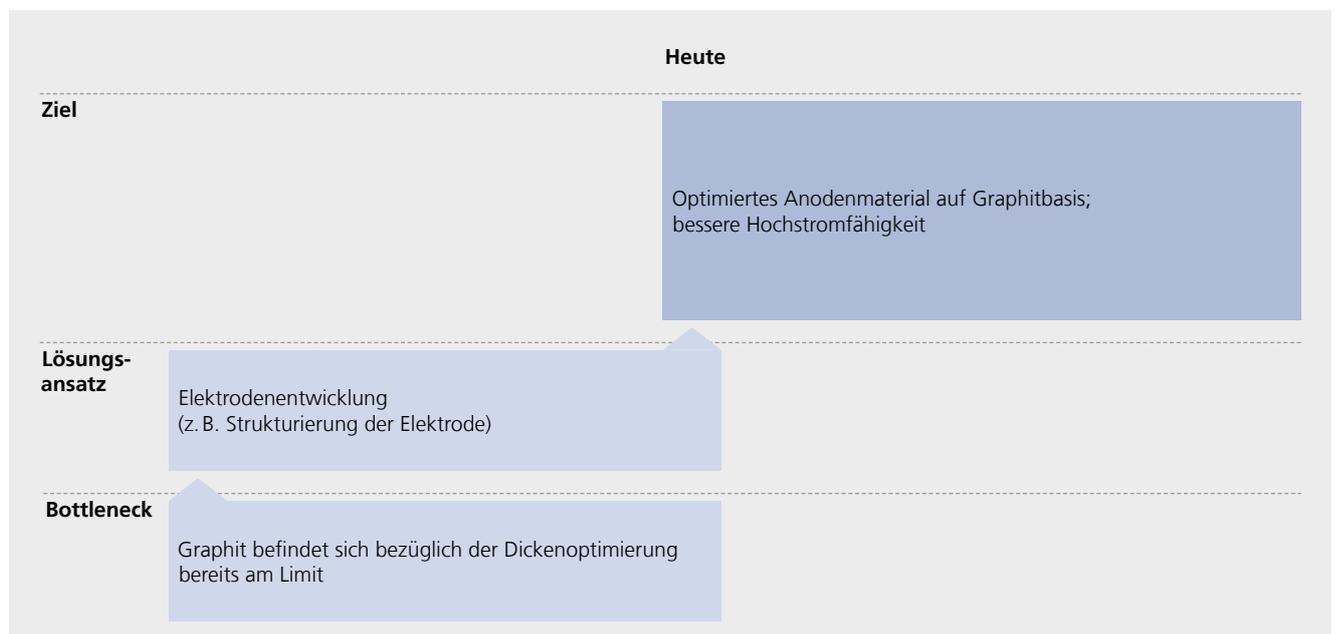
Ziel und geeignete Zellformate

Bisher wurden als Anodenmaterialien für LIBs fast ausschließlich natürliche und synthetische Graphite bzw. für Spezialanwendungen auch LTO eingesetzt. Die Weiterentwicklung der Energiedichten auf Kathodenseite erfordern zukünftig auch neue Aktivmaterialien auf der Anodenseite, um eine sinnvolle Elektrodenbalancierung ermöglichen zu können. Ein weiterer Treiber für die zunehmende Substitution von Graphit ist die gewünschte Schnellladefähigkeit künftiger Batterien.

Das konkrete Ziel ist dabei eine weitere Steigerung der Energiedichte, beispielsweise durch Erhöhung der Dichte in den Elektrodenschichten oder durch Nutzung graphithaltiger Komposite, z. B. mit Graphen, wodurch die intrinsische Interkalationskapazität von 360mAh/g übertroffen werden kann.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Graphite werden heute in allen Zellformaten als Aktivmaterialien verwendet und stellen derzeit den Stand der Technik dar, wobei keine massiven Verbesserungen mehr bei dem Material und der Elektrode zu erwarten sind. Bezüglich einer Dickenoptimierung befindet sich der Graphit bereits nahe am theoretischen Limit. Dagegen besteht noch Entwicklungspotenzial im Bereich der Elektrodenentwicklung, z.B. durch die Strukturierung der Elektrode oder in der Mischung verschiedener Graphittypen, Leitruße, Leit-CNTs oder Ähnliches.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Optimiertes Anodenmaterial (Energiedichte, Tiefentladeverhalten, Schnellladefähigkeit)	–	Kaum Optimierungsmöglichkeiten	Mittel	Am Markt (Optimierungsansätze TRL 4–5)	Alle
	Keine deutliche Steigerung der Energiedichte mehr möglich	Elektrodenentwicklung (z. B. Strukturierung der Elektrode)	Gegeben	Mittel- bis langfrishtg	

Vorteile und Nachteile

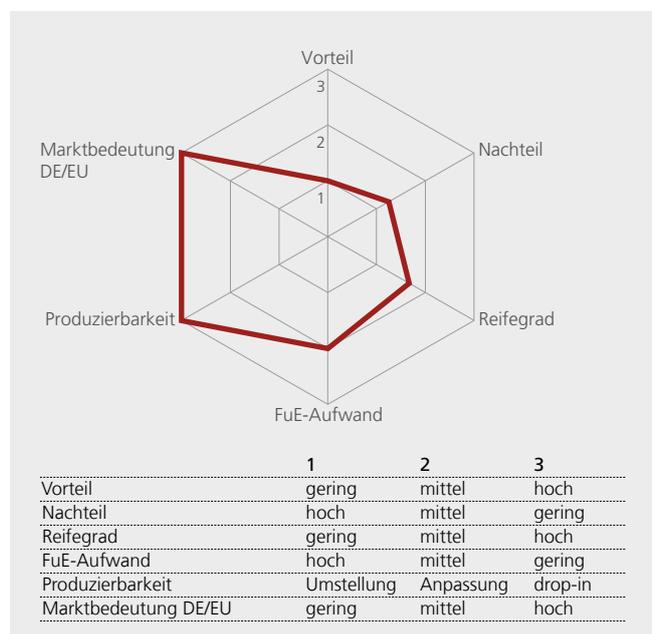
Insgesamt ergeben sich vermutlich keine weitere großen Vor- oder Nachteile. Es handelt sich um ein etabliertes System. Mit Blick auf die Erhöhung der Energiedichte sind Graphit-Anoden jedoch ausgereizt.

Aufwand und Produzierbarkeit

Der Aufwand einer weiteren Optimierung ist als Mittel zu sehen, da es kaum noch Optimierungsmöglichkeiten gibt und weitere Verbesserungen sehr aufwändig sind. Die Produzierbarkeit ist gegeben.

Reifegrad und Markteintritt

Graphite bilden heute den Stand der Technik und sind am Markt verfügbar.



ANODE

[7] Si/C-KOMPOSITE

Der Übergang von reinen Interkalationsmaterialien in LIBs zu Mischsystemen mit einem geringen Anteil an Legierungsmaterialien wie Silicium kann eine Möglichkeit darstellen, die spezifische Kapazität von reinen Kohlenstoffanoden (372 mAh/g entsprechend LiC_6) deutlich zu erhöhen. Silicium bietet eine theoretische Kapazität von etwa 3578 mAh/g (entsprechend $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$). Wie auch Graphit besitzt das Material eine sehr gute Rohstoffverfügbarkeit und geringe Toxizität. Mit einem Redoxpotenzial kleiner 0,5V gegen Li/Li^+ ist damit eine gute Kompatibilität zu graphitbasierten Anoden gegeben. Aufgrund der hohen Volumenänderung von Silicium bei der Legierung mit Lithium von bis zu 300 % sind Elektroden mit hohem Si-Anteil starken mechanischen Belastungen ausgesetzt. Si/C-Komposite können diesen Effekt teilweise abfangen. Mit einer Mischung aus 20 % Silicium und 80 % Kohlenstoff können Kapazitäten von etwa 1000 mAh/g erreicht werden.

Ziel

SiO/C-Komposite mit einem SiO-Anteil < 5 % werden bereits kommerziell in HE-LIBs eingesetzt. Composite mit einem Anteil von 20 % Silicium befinden sich momentan in der angewandten Forschung (TRL 4–5) und könnten zukünftig in Kombination mit NMC eine gravimetrische bzw. volumetrische Energiedichte von 300–350 Wh/kg und 1000 Wh/l ermöglichen. Aus Sicht der Leistungsfähigkeit werden mögliche Ladestromstärken von 1–3 C bis 80 % SOC prognostiziert. Die Bedeutung der Materialentwicklung und Herstellung für Deutschland wird als relativ hoch angesehen, da bereits Komponentenhersteller (Graphit: SGL Carbon, Si: Wacker Chemie) ansässig sind und über entsprechende Patente verfügen.

Bottlenecks und Lösungsansätze³⁵

Die Volumenänderung führt zu zweierlei Degradationserscheinungen: Die hohe mechanische Belastung kann zu einem Verlust der mechanischen Stabilität der Elektrode und damit der elektrischen Kontaktierung der Partikel führen. Zum anderen verursacht die Volumenänderung der Si-Partikel ein wiederholtes

	Heute	2020	2030+
Ziel	SiO/C am Markt mit 2–5 % SiO und 450 mAh/g (Zelle: wenige 100 Zyklen)	Steigerung der Energiedichte durch höheren Anteil von Si/C >5 % und 450–500 mAh/g (Zelle: 260–300 Wh/kg (NMC), 650–800 Wh/l, 300 Zyklen, 100–150 €/kWh)	Steigerung der Energiedichte durch höheren Anteil von Si/C bis hin zu 20 % und 1000 mAh/g (Zelle: 300–350 Wh/kg, 1000 Wh/l, ~500 Zyklen)
Lösungsansatz	Material- und Elektrodenarchitektur (Entwicklung geeigneter Composite aus Nanomaterialien); Elektrolytformulierung; Pre-Lithierung der Composite		
Bottleneck	Volumeneffekt/-änderung auf Partikel- und Anodenebene; Kapazitätsverlust durch das Aufbrechen und die Neubildung der SEI während der Zyklierung (Instabilität, Zyklenfestigkeit, Lebensdauer); Verarbeitbarkeit		

ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Anode mit hoher gravimetrischer und volumetrischer Energiedichte	Energiedichte	Volumenänderung, Elektrolytzersetzung, Li-Verlust, Verarbeitbarkeit	Si/C: Materialdesign, angewandte Forschung	SiO (2–5%) am Markt Si/C: TRL 4–7, reines Si: TRL 1–3	Alle, zylindrisch > prismatisch > Pouch
	Zellatmung und Lebensdauer	Material- und Elektrodenarchitektur, Elektrolytformulierung, Pre-Lithiierung	Si/C: Dispergierbarkeit von Nano-Si	Si/C: kurz- bis mittelfristig, reines Si: langfristig	

Aufbrechen und einen Wiederaufbau der SEI. Der resultierende Verlust an Elektrolyt und Aktivmaterial hat einen irreversiblen Kapazitätsverlust zur Folge.

Um die Volumenausdehnung abfedern zu können, ist die weitere Optimierung der Material- und Elektrodenarchitekturen notwendig. Ansätze bestehen in der Nanoskalierung der Si-Partikel oder einem porösen und flexiblen Aufbau der Kompositstruktur. Ein wichtiger Beitrag hierzu wird auch in der Weiterentwicklung kompatibler Binder gesehen³⁶. Poröse C-Strukturen können etwa 10 % Volumenänderung abfangen. Bei einer Volumenänderung von 50–100 % wird bei derzeitigem Stand der Technik von einem starken Einfluss auf die Lebensdauer ausgegangen.

Um die Stabilität der SEI während der Zyklisierung zu erhöhen, könnten Elektrolytverbesserungen beitragen. Andere Ansätze werden in der Herstellung von beschichteten Si-Partikeln, z. B. Core/Shell-Strukturen, gesehen. Der mit dem wiederkehrenden Aufbau der SEI einhergehende Lithiumverlust könnte durch eine teilweise Pre-Lithiierung der Anode abgefangen werden.

Vorteile und Nachteile

Der wesentliche Vorteil von Si/C-Kompositen besteht in der Erhöhung sowohl der gravimetrischen als auch der volumetrischen Energiedichten. Wie im Vorangegangenen beschrieben, erscheint eine Herabsetzung der Zellebensdauer unvermeidlich. Zudem sinkt die Energieeffizienz mit steigendem Si-Anteil von >90 % (<5 % Si) auf etwa 80–85 % (≥20 % Si) ab.

Aufwand und Produzierbarkeit

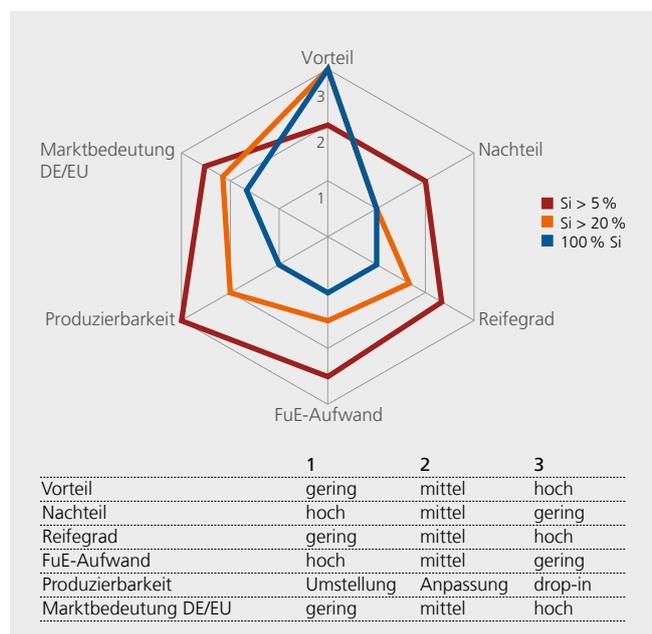
Die Kompatibilität bestehender Elektroden- und Zellproduktionsverfahren zu Si/C-Materialien wird als gut eingeschätzt. Die Eignung der Materialien wird insbesondere für zylindrische und prismatische Zellen gesehen, da in diesen Formaten ein zur Milderung von Ausdehnungseffekten günstiger äußerer Druck auf das Elektrodenstack aufgebracht werden kann. Aufgrund der leichten Aggregation von Nano-Si müssen jedoch Strategien für die Herstellung stabiler und verarbeitbarer Dispersionen entwickelt werden. Auf Materialebene existieren gegenwärtig verschiedene Konzepte zur Herstellung komplex strukturierter Komposite mit teilweise sehr guten elektrochemischen Eigenschaften.

Eine Skalierbarkeit in den Industriemaßstab muss teilweise noch bewiesen werden.

Ein Optimierungsbedarf der Materialien besteht auf Ebene der angewandten Forschung. Der Aufwand für die Entwicklung von Anoden mit >5 % Si-Anteil wird als gering, von Anoden mit Silicium >20 % als hoch eingeschätzt. Die Erhöhung der Zyklenzahl wird nicht als zwingend angesehen. Eine gewisse Reduktion der Zyklenfestigkeit erscheint akzeptabel, wenn durch den Einsatz von Si/C-Kompositen in gleichem Maße die speicherfähige Energie erhöht werden kann.

Reifegrad und Markteintritt

Die Technologie befindet sich am Markt. Es wird von einer kontinuierlichen Erhöhung des Si-Anteils ausgegangen. Der weitere Entwicklungspfad der Materialien und damit auch die theoretische Grenze sind reine Si-Anoden oder Anoden mit einem Si-Anteil von etwa 80 %³⁷.



ANODE

[8] LITHIUM-METALL

Bei diesem Ansatz werden Anoden aus Li-Metall anstelle von Graphit oder Silicium verwendet. Konzeptionell kann dabei eine sehr dünne Li-Schicht verwendet werden. Das Lithium der Anode ist dabei für die elektrochemische Reaktion nicht notwendig, da das gesamte benötigte Lithium bereits im Kathodenmaterial vorhanden ist. Die initiale Li-Schicht dient somit quasi als „Startpunkt“ für die weitere Li-Abscheidung während der Ladung der Zelle.

Ziel

Im Vergleich zu anderen Materialkonzepten stellt metallisches Lithium die Anode mit der maximal größten spezifischen Kapazität dar. Das Ziel dieses Ansatzes besteht in einer Steigerung der Energiedichte. Für lithiumbasierte Materialien ist eine zylindrische Zelle am besten geeignet, da diese die Volumenänderungen am besten verträgt. Die Reihenfolge ist auch hier (wie bei Si/C-Kompositen [7]): zylindrisch ist besser als prismatisch und diese ist besser als Pouch.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Bei der Verwendung einer Li-Metall-Anode besteht ein Bottleneck im Umgang mit der Volumenänderung und dem Dendriten-Wachstum, insbesondere bei höheren Stromdichten. Dieses führt zu einem Strukturverlust der Anode, wodurch zum einen größere Elektrolytvolumina benötigt werden und zum anderen die Gefahr eines internen Kurzschlusses besteht, sollten die Dendriten den Separator durchdringen. Lösungsansätze bestehen in der Verwendung von Feststoffelektrolyten oder entsprechend additivierten Flüssigelektrolyten, welche den Strukturverlust der Li-Anode einschränken sollen. Ferner besteht ein Bottleneck darin, dass aktuell keine kommerziellen dünnen Lithiumfolien zur Verfügung stehen. Zudem ist eine Kontaktierung ohne Trägerfolien sehr schwierig bezüglich der Handhabung und auch die weitere Verarbeitung ist relativ schwierig (Reaktivität von Lithium mit Luft und Wasser).



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Energiedichte steigern	Energiedichte	Volumenänderungen, Handhabung, Lebensdauer	Hoch	Angewandte Forschung (TRL 4-5)	Alle, zylindrisch > prismatisch > Pouch
	Volumenänderung, Lebensdauer	Feststoffelektrolyte, Elektrolytadditive, Hybridkonzepte	Neue Produktions- konzepte	Langfristig	

Vorteile und Nachteile

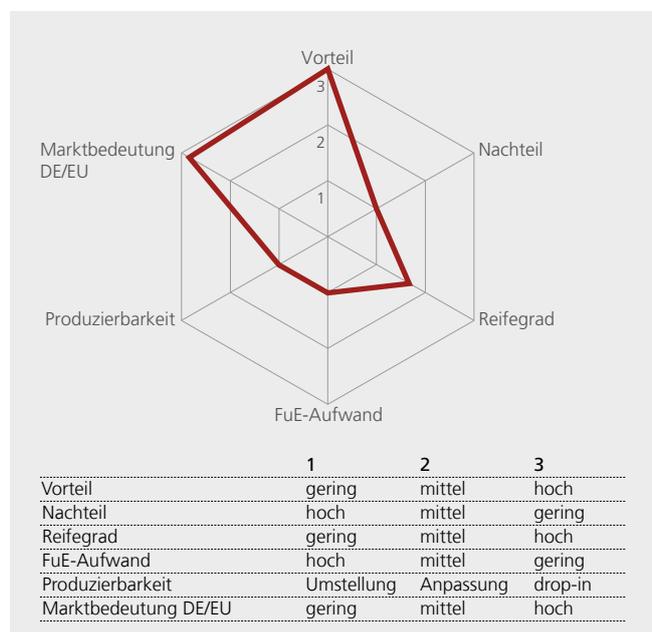
Als Vorteile dieses Ansatzes ergeben sich gesteigerte Energiedichten, jedoch gleichzeitig auch Nachteile durch die Volumenänderung und damit einhergehende Auswirkungen auf die Lebensdauer.

Aufwand und Produzierbarkeit

Der FuE-Aufwand zur Umsetzung der Li-Metall-Anode ist als hoch einzuschätzen. Zur Produzierbarkeit bedarf es voraussichtlich neuer Produktionskonzepte. Denn für die Verarbeitung von Li-Metall-Anoden fehlen bisher Konzepte, wie z. B. deren passivierende Beschichtung, um eine Prozessierung in Anwesenheit von Sauerstoff oder Wasser in der Atmosphäre zu ermöglichen. Beim Zellbau werden gegenüber Interkallations-LIBs andere Techniken benötigt, um die Volumenausdehnung der Li-Metall-Anode abzufedern.

Reifegrad und Markteintritt

Li-Metall funktioniert derzeit (mit Ausnahme der Zellen von Bolloré) nur im Labor, jedoch noch nicht im Produkt und kann daher eher der angewandten Forschung zugeordnet werden. Der Markteintritt von Li-Metall-Anoden dürfte nicht vor 2025 erfolgen.



ELEKTROLYT

[9] FLÜSSIGELEKTROLYT ADDITIVIERUNG

Der Elektrolyt hat einen wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer der Zelle. State of the art bilden derzeit die LiPF_6 -basierte Elektrolyte in Carbonatlösungsmitteln. Diese besitzen elektrochemische Stabilität bis etwa 4,4V. Das Stabilitätsfenster muss für die Nutzbarmachung von HV-Materialien vergrößert werden, z. B. auf bis zu 4,6V für HE-NMC bzw. 5V für Hochvoltspinelle. Viele der gegenwärtig auftretenden Schwierigkeiten beim Einsatz neuer Aktivmaterialien gehen auf Instabilitäten des Systems Elektrode/Elektrolyt zurück. Die Entwicklung passender Elektrolyte kann somit als entscheidender „Enabler“ für alle zukünftigen HE-Systeme angesehen werden.

Elektrolytadditive werden dem aus Li-Salzen und Carbonatlösungsmitteln bestehenden Elektrolyten zugesetzt, um seine Eigenschaften zu verbessern. So können Additive z. B. die Stabilität des Elektrolyten verbessern oder eine Schutzwirkung auf der Oberfläche von Aktivmaterialpartikeln ausüben.

Ziel und geeignete Zellformate

Das Ziel einer Additivierung besteht insbesondere in der Ermöglichung der Verwendung neuer Elektrodenmaterialien bzw. der Erhöhung der Lebensdauer derartiger Zellen. Weiter können Eigenschaften wie Nicht-Brennbarkeit, das Fenster für die Betriebstemperaturen (Tieftemperatur-Elektrolyt) oder die Spannungsstabilität verbessert werden. Dabei ist keine Einschränkung bei den verschiedenen Formaten zu erkennen, sofern die anderen Zellkomponenten entsprechend angepasst werden.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Schwierigkeiten bestehen bei der Suche nach geeigneten Additiven bzw. Additivkombinationen und der Optimierung bezüglich ihrer Konzentration in Elektrolyten. Ein möglichst geringer Anteil ist wünschenswert, um die Funktion des Elektrolyten als Ionenleiter nicht zu beeinträchtigen.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Sicherheit, Energiedichte	Si: Energiedichte, Kosten HV: Energiedichte	Kosten und verfügbare Materialien/ Verbindungen	Si: Gering bis mittel HV: Mittel bis hoch	Si-Additive und HV-Additive in angewandter Forschung (TRL 4–5)	Alle
	Si-Additive: Effektivität HV-Additive: Effektivität	Additiventwicklung, Konzentrations- optimierung, Herstellungsverfahren	Geringe Anpassungen	Kurz- bis mittelfristig	

Weiter gelten für Additive Kosteneinschränkungen, was die Entwicklung günstiger Herstellungsverfahren erfordert. Die Lösungsansätze bestehen sowohl im Bereich der Grundlagenforschung bei der Suche nach geeigneten Verbindungen/Materialien als auch im Bereich der Syntheseverfahren.

Vorteile und Nachteile

Bei den für Si-Anoden und HV-Kathoden geeigneten Additiven bestehen die Vorteile in der Ermöglichung höherer Energiedichten auf Zellebene. Zudem sind geringere Kosten für die Si-Additive zu erwarten. Gegenüber einem Komponentenwechsel können etablierte Hauptbestandteile (ggf. günstiger oder besser für Produktionsprozesse geeignet) verwendet werden.

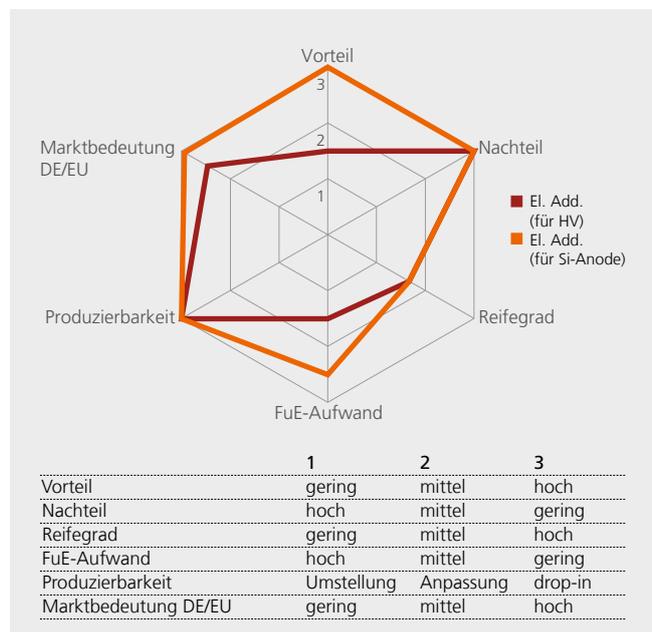
Auf der anderen Seite stellt bei den Si-Additiven und HV-Additiven die Effizienz der Additive einen Nachteil dar. Die Additive müssen entweder eine stabile SEI erzeugen oder sie bilden immer wieder SEI nach und werden dabei verbraucht und senken die Energieeffizienz der Zelle. Zudem tragen schützende Additive nichts zur Leitfähigkeit des Elektrolyten und somit zur „Funktion“ der Batterie bei, sodass sie ein zusätzliches passives Element darstellen.

Aufwand und Produzierbarkeit

Bezüglich des Aufwands muss zwischen HV und Si unterschieden werden: Für Si kann er als gering bis mittel angesehen werden, während er für HV leicht höher ist und als mittel bis hoch beziffert wird. Die Produzierbarkeit erscheint in beiden Fällen möglich, erfordert jedoch geringe Anpassungen bei den Prozessen.

Reifegrad und Markteintritt

Bei Additiven für Si-Anoden und HV-Additiven befindet man sich im Forschungsbereich bzw. Vorprototyp. Ein Markteintritt könnte ab dem Jahr 2020 erfolgen.



ELEKTROLYT

[10] ALTERNATIVER FLÜSSIG-ELEKTROLYT

Durch einen Komponentenwechsel beim Elektrolyten soll dieser die Eignung als nicht brennbarer Elektrolyt, Tieftemperatur-Elektrolyt oder Elektrolyt für Hochvolt-Materialien erlangen.

Ziel und geeignete Zellformate

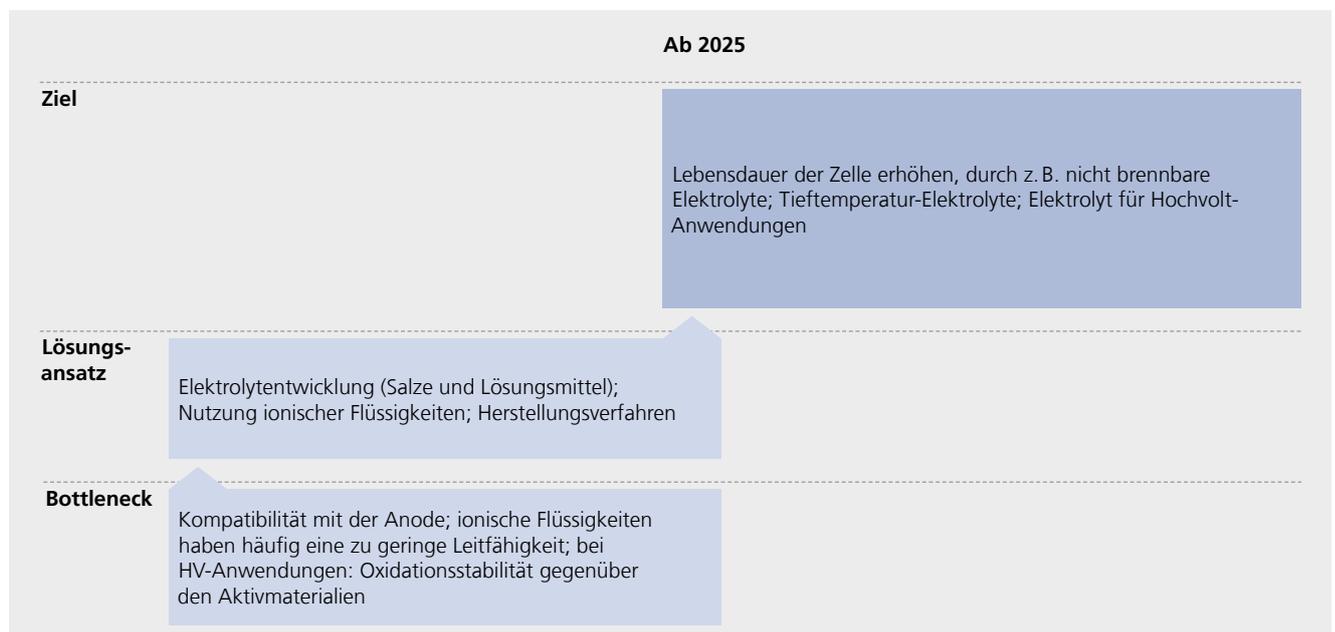
Das Ziel eines Komponentenwechsels ist es, die Lebensdauer der Zelle zu erhöhen oder die Einsatzmöglichkeiten von LIBs zu verbessern. Der Austausch von Salzen oder Lösungsmitteln zielt z. B. auf die Vergrößerung des nutzbaren Spannungsfensters ($>4,5$ V) oder auf die Verbesserung der chemischen Stabilität ab, die für viele neue Aktivmaterialien mit Standardelektrolyten nicht gegeben ist. Weitere Ziele sind die Reduktion der Brennbarkeit oder die Erweiterung des Fensters für mögliche Betriebstemperaturen. Bei dem Komponentenwechsel ist ebenfalls keine Problematik bei den Formaten zu erkennen, sofern die anderen Zellkomponenten entsprechend angepasst werden.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Die konkreten Herausforderungen sind stark abhängig vom betrachteten Material-/Elektrolytsystem bzw. von der genauen Zielsetzung der Elektrolytentwicklung. Bei HV-Anwendungen ist die Oxidationsstabilität gegenüber den Aktivmaterialien zu garantieren. Bei einem Komponentenwechsel ist zudem eine Kompatibilität mit der Anode zu gewährleisten. Ionische Flüssigkeiten haben häufig eine zu geringe Leitfähigkeit, was die maximale Stromdichte (power rate) limitiert. Zudem sind sie relativ teuer.

Vorteile und Nachteile

Die Ermöglichung des Einsatzes von HV-Materialien könnte die Energiedichte auf Zellebene erhöhen. Durch nicht brennbare Elektrolyte wird zudem ein höheres Maß an Sicherheit ermöglicht. Bei einem erweiterten Betriebstemperaturbereich kann evtl. teilweise auf eine Kühlung verzichtet werden, wenn die Stabilität der SEI noch gewährleistet ist. Bei einem Komponentenwechsel sind die Kosten als nachteilig zu benennen.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Sicherheit, Energiedichte	HV: Energiedichte Brennbar: Sicherheit	Ox. Stabilität, Kompat. mit Anode, Kosten, Power Performance Brennbarkeit: Kompat. mit Anode	Brennbarkeit: Mittel HV: Mittel bis hoch	HV: Angewandte Forschung (TRL 4–5), Brennbarkeit: Prototyp (TRL 6–7)	Alle
	HV: Kosten Brennbarkeit: Zyklusstabilität, Lebensdauer	Elektrolytentwicklung (Salze und Lösungs- mittel), Nutzung ionischer Flüssigkeiten, Herstellungsverfahren	Geringe Anpassungen	Mittel- bis langfristig	

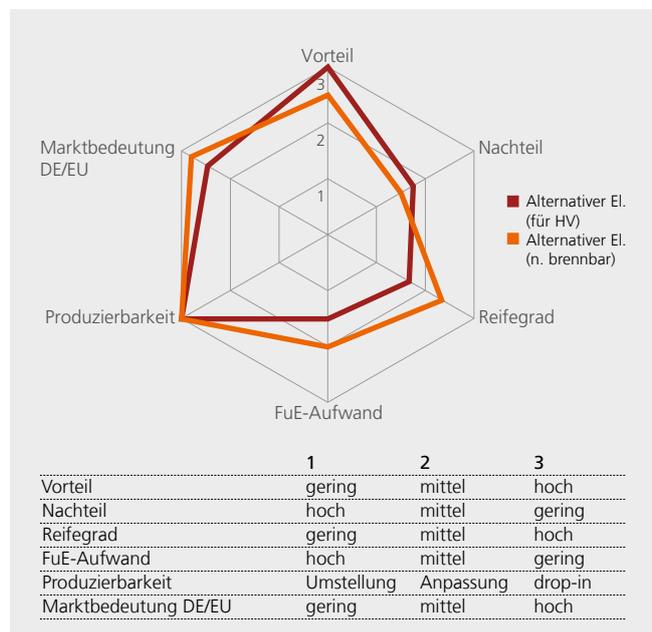
Organische Carbonate sind relativ günstig, während alle anderen Materialien derzeit noch recht teuer sind. Zudem stellen die verringerte Zyklusstabilität und die Lebensdauer bei nicht brennbaren Elektrolyten und Tieftemperatur-Elektrolyten einen Nachteil dar.

Aufwand und Produzierbarkeit

Bei dem Komponentenwechsel muss, wie bereits bei der Additivierung, eine Unterscheidung zwischen HV-Anwendungen und der Hemmung von Brennbarkeit vorgenommen werden: Der Aufwand kann für brennbarkeithemmende Elektrolyte als mittel angesehen werden, während er für HV wiederum leicht höher ist und als mittel bis hoch eingestuft wird. Die Produzierbarkeit dürfte mit geringen Anpassungen möglich sein.

Reifegrad und Markteintritt

Insgesamt ist der Ansatz eines Komponentenwechsels bei Elektrolyten noch sehr jung und im Forschungsstadium, mit Ausnahme bei der Brennbarkeit und beim Tieftemperatur-Elektrolyt. Der Markteintritt dürfte daher in etwa um die Jahre 2025 bis 2030 erfolgen.



ELEKTROLYT

[11] FESTELEKTROLYT POLYMER SPE/CPE

Technologie und Ziel

Polymere können durch die Komplexbildung mit Li-Salzen ionenleitend gemacht werden (SPE). Dabei werden die Salze in den Polymerketten gelöst. Der Ionentransport geschieht über die Beweglichkeit der Ketten im Polymer. Der bekannteste Vertreter dieser Klasse ist Polyethylenoxid/LiTFSI. SPEs besitzen bei Raumtemperatur meistens eine niedrige Ionenleitfähigkeit, welche eine praktische Anwendung verhindert. Durch Kombination mit keramischen oder metall-organischen Nanopartikeln zu Kompositelektrolyten (CPE composite polymer electrolyte) kann die Leitfähigkeit von Polymerelektrolyten deutlich erhöht werden. Neben anderen Effekten hemmt die Anwesenheit der Nanopartikel die Kristallisation der Polymerketten und erhöht damit deren Beweglichkeit.

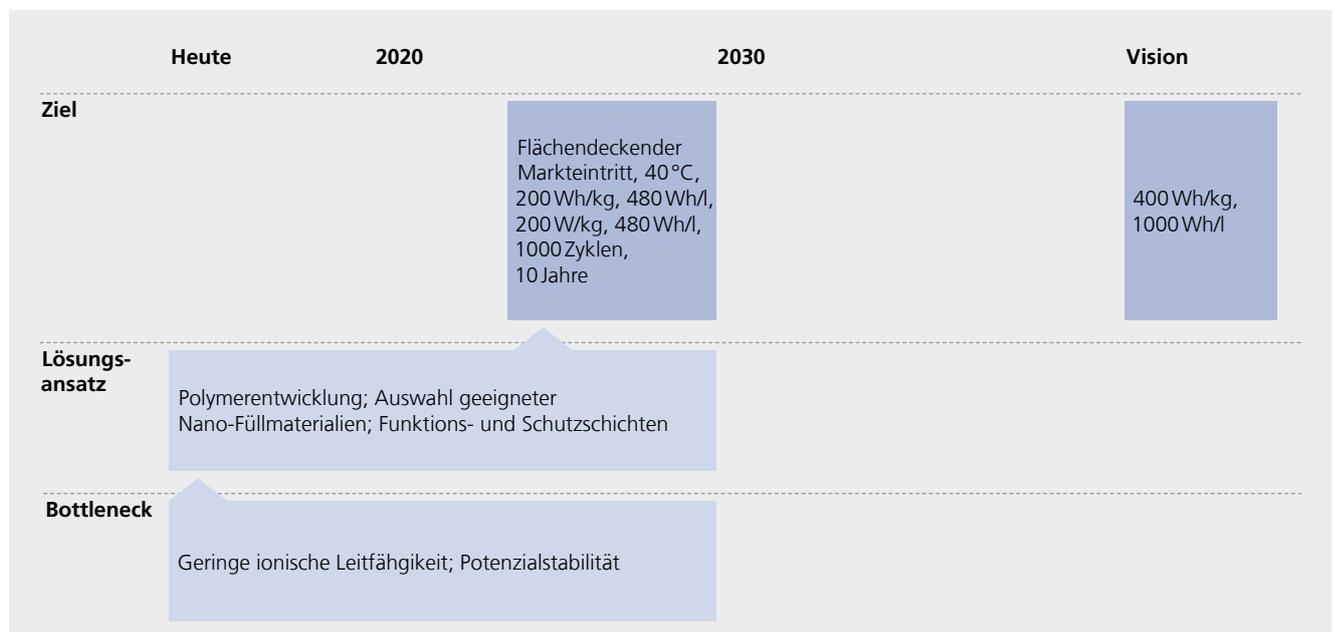
In Kombination mit einer Li-Metall-Anode und LFP-Kathode werden polymerbasierte Feststoffbatterien bereits in kommerziellen Testprojekten eingesetzt. Die Technologieentwicklung wird auf TRL 7 eingeschätzt. Bei einer Betriebstemperatur von 80°C werden aktuell auf Zellebene etwa 150Wh/kg, 280Wh/l, 75W/kg,

140W/l erreicht. Momentan verfügbare Systeme beinhalten häufig eine Restmenge Flüssigelektrolyt.

Die Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung des Polymerelektrolyts ist gut. In Batteriesystemen werden die Kosten derzeit noch durch die Li-Anode bestimmt, deren Preis invers zur Schichtdicke steigt. Die Bedeutung der Technologie für Deutschland und Europa wird als hoch eingeschätzt. Es wird davon ausgegangen, dass Wertschöpfungsketten innerhalb der EU etabliert werden könnten. Deutschland und die EU werden in diesem Sinne als international wettbewerbsfähig erachtet.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Schwächen der Technologie ergeben sich aus der niedrigen ionischen Leitfähigkeit und der resultierenden hohen Betriebstemperatur. Gegenüber SCEs (siehe [13]) ist die Potenzialstabilität von polymerbasierten Elektrolyten schlechter, sodass eine Verwendung mit Hochvoltkathoden derzeit nur in Ausnahmefällen möglich ist. Lösungsansätze bestehen in der weiteren Suche nach geeigneten Nano-Füllmaterialien, anderen Polymeren oder Polymerkombinationen. Die Verwendung von Funktions- oder Schutzschichten kann die chemische Stabilität der Mate-



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Sicherheit, Energiedichte, einfaches Batterie-System	Sicherheit, Ökobilanz	Potenzialstabilität, nutzbarer Temperaturbereich	Produktions- technologie, Materialien	Demonstratoren (TRL 7)	Alle Zellformate
	Temperaturbereich, Potenzialstabilität	Stabile Materialien, Funktionsschichten, Interfaces	Möglich mit heutigen Technologien	Mittelfristig	

rialien untereinander verbessern. Der FuE-Aufwand wird als mittelmäßig hoch eingeschätzt und liegt im Bereich der Material- und Produktionsentwicklung.

Vorteile und Nachteile

Das wesentliche Alleinstellungsmerkmal der SPEs/CPEs ist die höhere Sicherheit von Zellen und die Möglichkeit durch Reduzierung passiver Komponenten die Zellenergiedichte besser auf Modulebene übertragen zu können. Durch den Komponentenwechsel auf Seiten der Anode und des Separator/Elektrolyt lässt sich eine höhere insbesondere volumetrische Energiedichte erzielen. Kathodenseitig besteht keine Veränderung gegenüber LIBs. Generell bieten Polymerelektrolyte die Möglichkeit, den Präparationsprozess ggf. trocken oder lösungsmittelreduziert durchführen zu können. Die aktive Beheizung der Zellen bedeutet eine gewisse Unabhängigkeit gegenüber der Umgebungstemperatur.

Als nachteilig wird der insgesamt hohe Innenwiderstand der Feststoffbatterien eingeschätzt, welcher den Betrieb bei hohen Temperaturen erfordert. Dies kann zu einer Verkürzung der Lebensdauer führen. Zudem besitzen Li-Metall-Elektroden eine im Vergleich zu Graphit schlechtere Hochstromfähigkeit (Dendritenbildung). Die gravimetrische Energiedichte der Zellen liegt auf einem zu LIBs vergleichbaren Niveau.

Produzierbarkeit

Die Produzierbarkeit von SPE-basierten Feststoffbatterien ist gegeben und wurde durch den Markteintritt 2009 gezeigt. Für die Produktion durch weitere Hersteller sind geringe Anpassungen bei der Produktionstechnologie von Zelle auf Modul nötig. Gegenüber SCE-Batterien ist aufgrund der Flexibilität von Polymerschichten eine einfachere Prozessierbarkeit gegeben. Hinsichtlich möglicher Zellformate werden keine Einschränkungen gesehen.

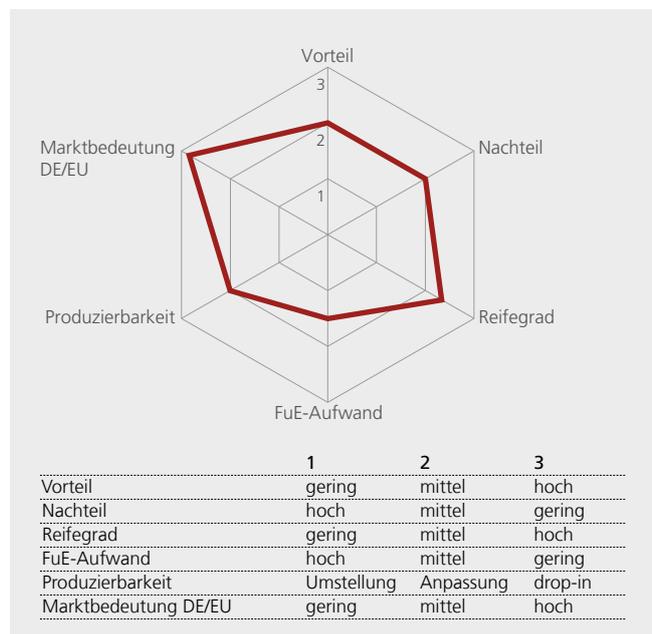
Anwendungen

Ein Einsatz der Technologie wird insbesondere in Anwendungen mit Dauerbetrieb gesehen, da dies die dauerhafte Beheizung der Zellen rechtfertigen könnte. Weitere Möglichkeiten existieren im Bereich der Spezialfahrzeuge und stationärer Speicher.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Ziel der Entwicklung ist die Reduktion der notwendigen Betriebstemperatur und die Verkleinerung von Schichtdicken. Zur Erhöhung der Energiedichte ist die Erhöhung der Spannungsstabilität nötig. Als weiterer Entwicklungsschritt wird die Erhöhung der Leistungsparameter bis 2025 auf 200 Wh/kg, 480 Wh/l, 200 W/kg, 480 W/l (1 C) bei 1000 Zyklen und einer Lebensdauer von 10 Jahren erwartet. Dies bei einer Betriebstemperatur von 40°C und EUCAR Sicherheitsstufe 2–3. Die Grenze der Systeme wird bei 400 Wh/kg und 1000 Wh/l gesehen.

Weitere technische Verbesserungen sind durch die Nutzung sogenannter „Single-Ion“-Leitpolymere denkbar. Mitunter weisen diese eine gegenüber derzeit verwendeten Systemen höhere Leitfähigkeit bei niedrigerer Betriebstemperatur auf. Aufgrund der Ionen-Überführungszahl von 1 solcher SPEs, könnte durch den theoretisch möglichen homogenen Li-Transport sowie den vermiedenen Konzentrationsgradienten die Ausbildung von Li-Dendriten verhindert werden.



ELEKTROLYT

[12] FESTSTOFFELEKTROLYT HYBRID

Technologie und Ziel

Polymer-Keramik-Hybride können von reinen Polymersystemen kommend die Performanceeigenschaften von Elektrolyten verbessern. Bei der Kombination von einem hohen Anteil an SCEs (siehe [13]) in einer eher passiven Polymermatrix wird letztere als Stütze verwendet, um mechanische Probleme zu lösen, während die Funktionalität als Elektrolyt durch den SCE ausgeführt wird. Gegenüber rein keramischen Systemen wird dies mit einem gewissen Performanceverlust erkaufte, da die Hybridisierung die Einbringung zusätzlicher Grenzflächen bedeutet.

Als Technologieziel werden Zellen mit Li-Metall-Anode und dünner Elektrolytschicht gesehen, deren mechanischer Aufbau durch die Polymerhybridisierung erleichtert wird. Der momentane Entwicklungsstand wird auf TRL 5–6 eingeschätzt.

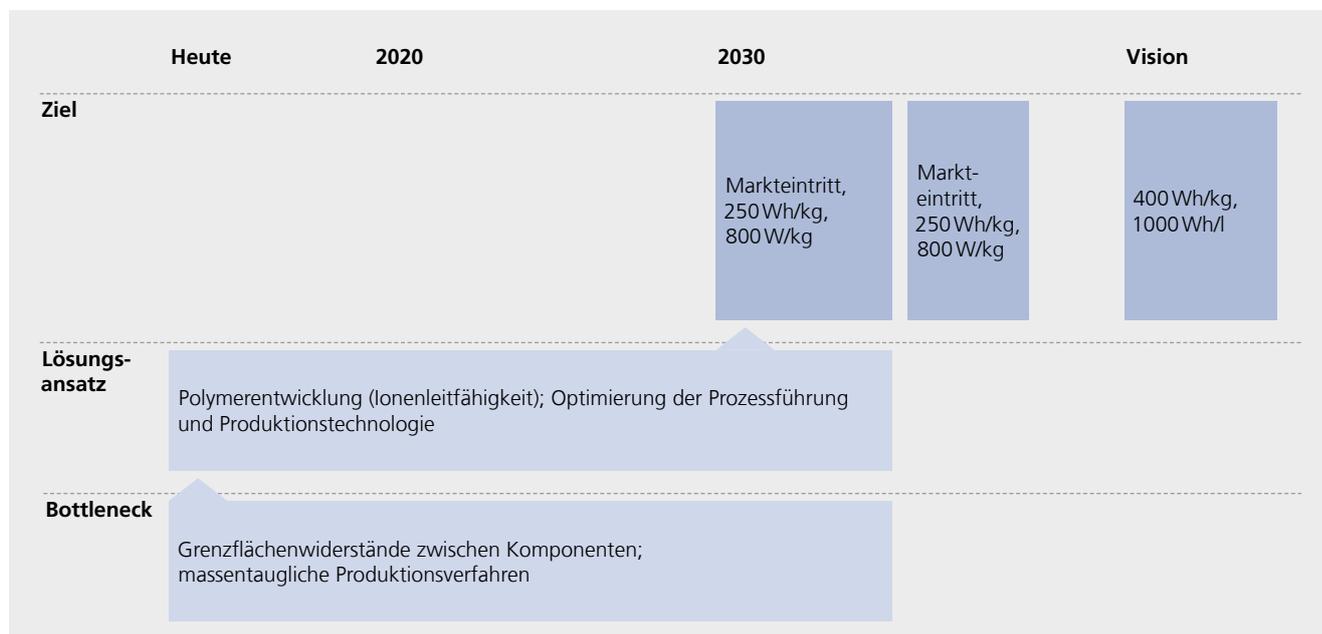
Die Bedeutung für Deutschland und Europa wird als hoch eingestuft. Gegenüber dem asiatischen Markt besteht eine gute Wettbewerbsfähigkeit.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Schwächen werden sowohl aufgrund hoher Grenzflächenwiderstände an den Komponenteninterfaces als auch bei der Produktionstechnologie gesehen. Lösungsansätze bestehen im Bereich der Prozessführung. Die Leitfähigkeit der Hybride kann weiter erhöht werden, wenn als Polymer selbst leitfähige SPEs zum Einsatz kommen. Der FuE-Aufwand im Bereich Produktionstechnologie wird als mittelmäßig hoch eingeschätzt.

Vorteile und Nachteile

Analog zu den SCE- und SPE-Elektrolyten werden die größten Vorteile durch eine höhere Sicherheit der Zellen und der besseren Übertragbarkeit von Energiedichte auf Modulebene gesehen. Als nachteilig gegenüber reinen SCE-Systemen wird die geringere Ionenleitfähigkeit durch die zusätzlichen Grenzflächen, welche sich hemmend auf die Kinetik auswirken, erachtet. Gegenüber LIBs werden tendenziell höhere Material- und Produktionskosten erwartet.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Höhere Sicherheit, weniger Verlust Performance → Systemebene	Sicherheit, Energiedichte	Interfaces, Produktions- technologie	Produktions- technologie	Angewandte Forschung (TRL 5–6)	Zellformate, die das Stapeln der Mehrfachschichten erlauben
	Preis	Prozessführung, Interfaces, ionen- leitfähige Polymer- Keramik-Hybride	Nicht gelöst, aufwändiges Design, einfacher als vollkeramisch	Mittel- bis langfristig	

Produzierbarkeit und Aufwand

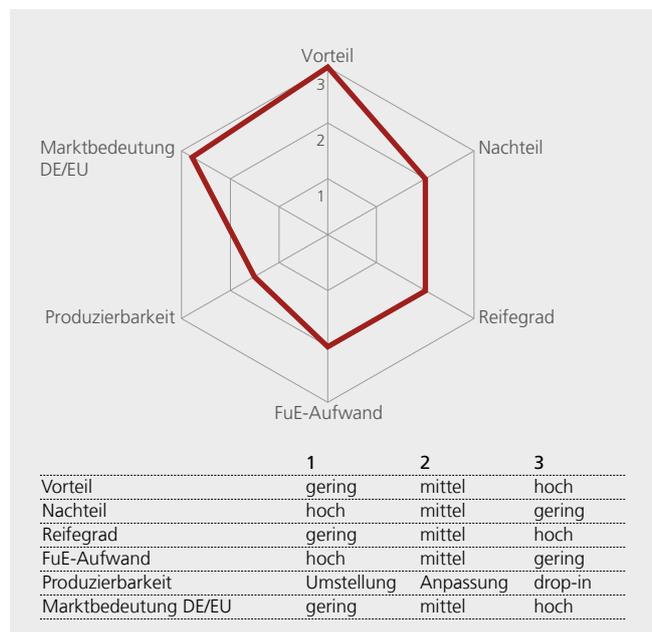
Es wird erwartet, dass die Hybridisierung im Vergleich zu reinen SCEs zu einfacheren Verarbeitungsverfahren führt. Aus heutiger Sicht ist die Produzierbarkeit jedoch nicht gelöst und es werden neue Ansätze benötigt. Für die Produktion sind Zellformate nötig, die das Stapeln der Mehrfachschichten erlauben.

Anwendungen

Mögliche Anwendungen werden analog zu keramischen Elektrolyten (siehe [13]) gesehen.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Der mögliche Markteintritt von Zellen mit hybriden Feststoffelektrolyten wird für 2030 antizipiert. Es sind Leistungsparameter von 250Wh/kg und 800W/kg möglich. Bis 2035 wird eine Verbesserung der Parameter auf 350Wh/kg, 1200W/kg, 700Wh/l bei 1500 Zyklen und einer Lebensdauer von 15 Jahren erwartet. Im Vergleich zu reinen SCE-Batterien ist mit einer etwas geringeren Leistungsdichte zu rechnen. Die theoretische Grenze liegt im Bereich 400Wh/kg und 1000Wh/l.



ELEKTROLYT

[13] FESTELEKTROLYT KERAMISCH SCE

Technologie und Ziel

Die anorganischen Feststoffelektrolyte können in die Klassen der sulfidischen und der keramischen oxid- bzw. phosphatbasierten Elektrolyte unterteilt werden. Unterschiede bestehen sowohl in ihren Eigenschaften als Ionenleiter als auch in der zur Herstellung und Anwendung nötigen Prozesstechnik.

Aktuell wird der Forschungsstand für beide Materialklassen auf TRL 4 eingeschätzt. Energiedichten liegen im Bereich 50 Wh/kg bei Stromstärken von C/10. Für sulfidische Zellen sind 1000 Zyklen möglich, während die Stabilität oxidischer und phosphatischer Systeme auf wenige 10 Zyklen beschränkt ist.

Die Bedeutung der Technologie für Deutschland und Europa wird als sehr hoch eingeschätzt. Entsprechende Entwicklungsaktivitäten finden jedoch weltweit statt, besonders in Japan und den USA.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Als größte Schwäche von SCEs, insbesondere den oxidischen, werden die hohen Grenzflächenwiderstände (Aktivmaterial/Elektrolyt) und das Auftreten von Li-Metall-Dendriten angesehen. Sulfidische SCEs können bei Raumtemperatur betrieben werden, brauchen aber einen hohen statischen Druck auf die Zelle und zeigen in Anwesenheit von Hochvoltkathoden keine gute chemische Stabilität. Weder Sulfide noch Phosphate sind gegenüber Li-Metall-Anoden stabil. Lösungsansätze werden im Wesentlichen im Bereich der Materialentwicklung und Optimierung gesehen. Besonders passivierende Schutzschichten können wesentliche Eigenschaften der Systeme verbessern. Hier besteht im Bereich der sulfidischen SCEs ein Entwicklungsvorsprung. Der FuE-Aufwand wird als hoch eingeschätzt und besteht vor allem darin, die chemische Kompatibilität der Materialien zu verbessern, Widerstände weiter abzubauen und einen geeigneten Produktionsprozess zu etablieren. Auf Zellebene müssen Konzepte gefunden werden, welche die Dendritenbildung bei Verwendung von Metall-Anoden und die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Zellmaterialien abfedern können.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Höhere Sicherheit, weniger Verlust bei Performance Zelle → System	Sicherheit, Energiedichte	Übergangswider- stände, Produktions- technologie, geeignete Zelldesigns	Material (Kompatibilität), Produktionsprozesse	Grundlagen- und angewandte Forschung (TRL 4)	Stapelung der Schichten muss möglich sein
	Komplexität, Preis	Materialentwicklung, Schutzschichten, Prozessführung	Nicht gelöst, dünne Schichten, groß- flächig, Stapeln	Mittel- bis langfristig	

Vorteile und Nachteile

Der größte Vorteil auf Zellebene besteht in der Ermöglichung hoher Energiedichten und insbesondere für oxidische SCEs in der Verbesserung der Sicherheitscharakteristika gegenüber flüssigen Elektrolyten. Beim Übergang auf Modulebene kann damit die Komplexität verringert werden und es können evtl. Einsparungen bei der Einhausung und dem Kühlsystem erfolgen. Nachteile werden in den durch Materialpreis und Herstellungsprozess erzeugten höheren Kosten gesehen und der derzeit noch geringen realisierten Leistungsdichte bei Raumtemperatur.

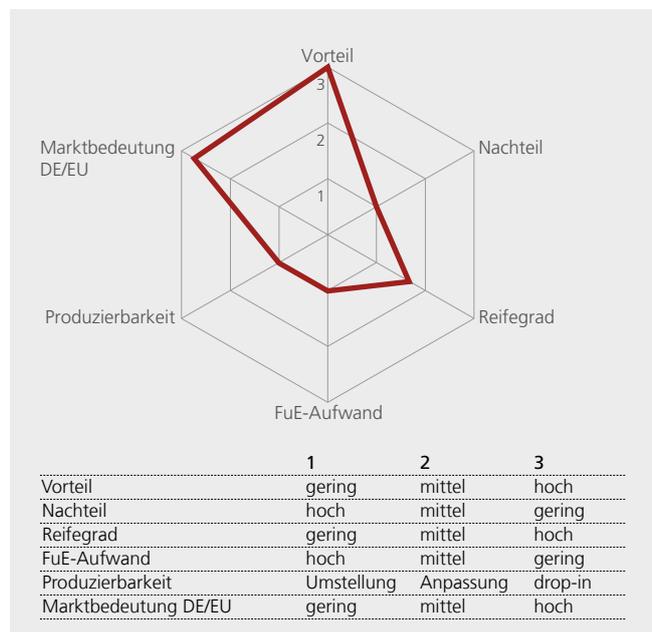
Produzierbarkeit und Aufwand

Oxidische Keramiken müssen bei hohen Temperaturen gesintert werden, um die nötigen Dichten zu erreichen und die Korngrenzenkontakte zu verbessern. Hieraus ergeben sich Kompatibilitätsprobleme mit vielen Aktivmaterialien, da diese bei höheren Temperaturen instabil sind und sich zersetzen oder Sekundärphasen an der Grenzfläche zwischen Elektrolyt und Elektrodenmaterial ausgebildet werden können, die im Allgemeinen hohe Grenzflächenwiderstände zur Folge haben. Im Gegensatz dazu konnten die Grenzflächenwiderstände von bei Raumtemperatur präparierten Sulfid-SCEs durch geeignete Modifikation der Grenzfläche in einen für die Anwendung akzeptablen Bereich gebracht werden, jedoch ergeben sich aus der generellen Reaktivität der Materialien höhere Ansprüche an die Prozessatmosphäre während der Herstellung und Verarbeitung.

Für die Produktion von Feststoffbatterien existiert bislang kein etablierter Prozess. Als schwierig erweist sich die großflächige Abscheidung dünner Elektrolytschichten sowie die anschließende Handhabung und das Stapeln der Zellen zu elektrochemischen Systemen. Es wird nicht davon ausgegangen, dass freistehende Keramiksichten mit einer Dicke um oder unter 10 µm produzier- und handhabbar sind. Das Format der Zellen wird als zweitrangig angesehen, jedoch muss die Geometrie eine Stapelung von Schichten zulassen. Insgesamt ist eine völlig neue Prozesstechnologie und Führung notwendig.

Reifegrad/Marktnähe

Ein Markteintritt könnte bei Überwindung der Bottlenecks 2030 mit 250Wh/kg, 1000W/kg, 3 C Ladestrom und einer Lebensdauer von 10 Jahren/1000 Zyklen erfolgen. Durch die Weiterentwicklung sind 2035 Leistungswerte von 350Wh/kg, 800Wh/l, 1500W/kg, 6 C Ladung und 15 Jahre Lebensdauer bei einer Zyklenstabilität von 1500 Zyklen möglich. Die praktisch erreichbare Grenze der momentan betrachteten Systeme liegt bei 400Wh/kg und 1200Wh/l. Es wird von einer schnellen Steigerung der KPI nach Überwindung der wesentlichen Bottlenecks ausgegangen. Potenziell wird die Technologie als „Game-Changer“ für die Elektromobilität eingeschätzt. Die Nutzbarmachung ist jedoch mit hohen Herausforderungen verknüpft. In der weiteren Entwicklung könnten Elektrodenstapel auch dazu verwendet werden, hohe Spannungen auf Zellebene zu realisieren und damit eine hohe Leistungsdichte zu ermöglichen.



SEPARATOREN

[14] STABILE SEPARATOREN

Die Entwicklung stabiler Separatoren betrifft Separatoren, die in der Zellproduktion und im Feldeinsatz thermisch und mechanisch stabil sind. Dies betrifft insbesondere die sogenannten keramischen Separatoren bzw. keramisch beschichteten Membranen.

Ziel und geeignete Zellformate

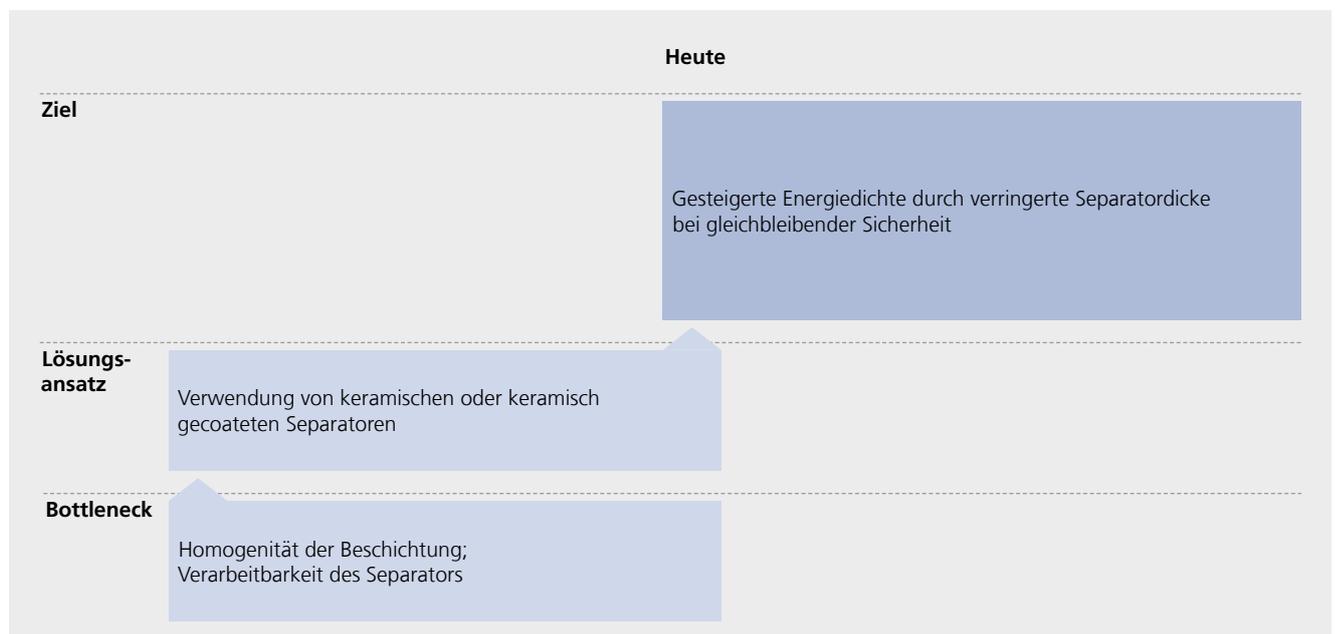
Grundsätzliches Ziel ist es, die Dicke der Separatoren bei möglichst verbesserter Sicherheit der Zelle zu reduzieren. Keramische Separatoren sind aktuell 21–28 µm dick, keramisch gecoatete Separatoren ca. 12–24 µm. Ziel ist es zukünftige Dicken deutlich dünner als 20 µm herzustellen, jedoch ohne Sicherheitsverluste, bei gleichzeitiger Nutzung von Hochenergieelektroden. Derzeit werden hierfür Polyolefinmembranen mit anorganischen Partikeln beschichtet bzw. Separatoren mit einer durchgehenden Schicht anorganischer Partikel ausgeführt. Beim Format sind keine Probleme erkennbar, wenn die anorganischen Partikel gut haftend mit dem Träger verbunden werden und eine ausreichende Zugfestigkeit für den Wickel/Stapelprozess vorliegt.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Ein wesentlicher Bottleneck sind die Homogenität der Beschichtung und die Verarbeitbarkeit des Separators. Gleichzeitig müssen die Herstellprozesse so dargestellt werden, dass die Kosten der Separatoren marktgerecht entwickelt werden können.

Vorteile und Nachteile

Ein stabiler Separator bietet neben der höheren thermischen Stabilität eine hohe Sicherheit (beispielsweise beim Nageltest, Überladungstest, Hotbox-Test). Ein weiterer Vorteil ist die erhöhte Zyklusstabilität. Ebenso ist das „wetting“ und die hohe Prozessierungstemperatur von vollkeramischen Separatoren signifikant besser als bei konventionellen membranbasierten Separatoren. Nachteilig sind die erhöhten Kosten im Vergleich zu reinem PP oder PE. Zudem sind die keramischen Materialien schwerer. Dies bedeutet, dass keramikbasierte oder modifizierte Separatoren vergleichsweise dünner sein müssen als reine Membran-Separatoren, um die Energiedichten der Zellen nicht zu verschlechtern.



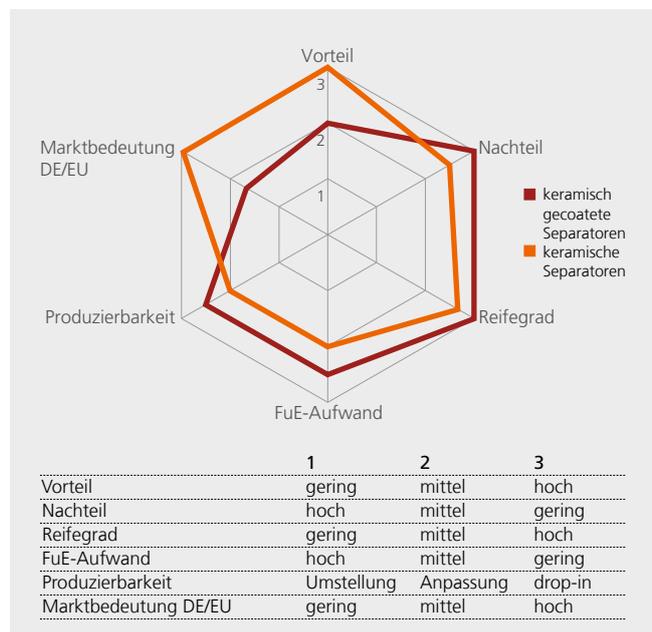
ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Sicherheit und Energiedichte	Sicherheit, Zyklusstabilität, Benetzung	Homogenität, Beschichtung, Verarbeitbarkeit	Keramisch: Mittel Gecoatet: Mittel bis hoch	Prototyp bis Markt (>TRL 7)	Alle
	Kosten	Keramisch beschichtete oder keramische Separatoren	Keramisch: Mittlere Anpassungen Gecoatet: Geringe Anpassungen	Am Markt	

Aufwand und Produzierbarkeit

Der Aufwand für diesen Ansatz hierzu ist für die keramisch gecoateten Separatoren als gering bis mittel einzuschätzen, wobei für die Produzierbarkeit ebenfalls geringe bis mittlere Anpassungen nötig sein dürften. Der Aufwand für die keramischen Separatoren ist als mittel einzustufen, ebenso wie die Anpassungen für die Produzierbarkeit.

Reifegrad und Markteintritt

Die Reife ist mindestens im Prototyp-Stadium, wenn nicht sogar marktreif.



SONSTIGE ANSÄTZE AUF ZELLEBENE

[15] INAKTIVE MATERIALIEN OPTIMIEREN

Als inaktive Materialien werden bei diesem Ansatz insbesondere der Stromableiter und das Casing verstanden. Zudem auch Schutzschichten, Binder, Klammern, Federn oder Überdruckventile.

Ziel und geeignete Zellformate

Das Ziel dieses Ansatzes ist eine Steigerung der Energiedichte durch Inaktivmaterialoptimierung und Materialreduzierung (z. B. Binderanteil). Die Ansätze sind hierbei sehr vielfältig. Häufig wird die Reduktion von Schicht- und Trägerdicken beabsichtigt. Durch Substitution von Materialien kann ggf. das Gewicht der inaktiven Komponenten reduziert werden. Der Ansatz inaktive Materialien zu optimieren ist dabei prinzipiell unabhängig vom Format. Die konkreten Strategien können sich jedoch sehr deutlich unterscheiden, da starke bauformabhängige (und auch größenabhängige) Anforderungen an das Zelldesign bestehen.

Bottlenecks und Lösungsansätze

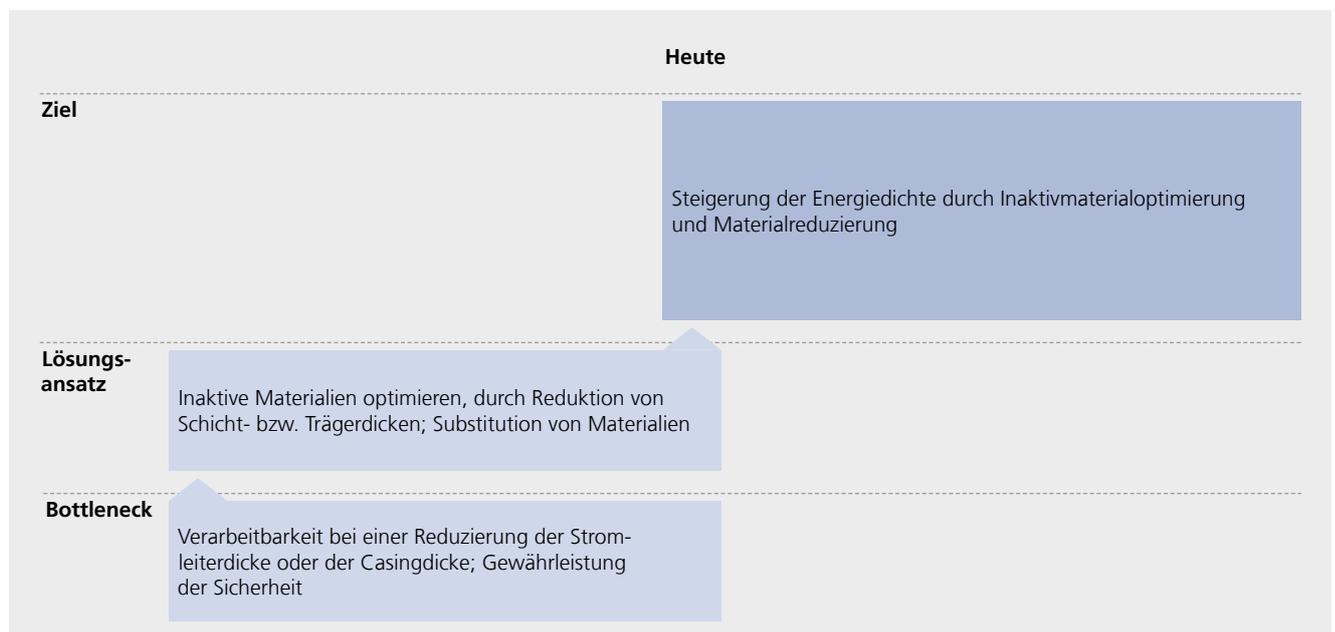
Bottlenecks liegen insbesondere in der Verarbeitbarkeit bei einer Reduzierung der Stromleiterdicke oder der Casingdicke. Zudem stellt auch die Gewährleistung bzw. der Nachweis der Sicherheit unter der neuen Modifikation einen Bottleneck dar.

Vorteile und Nachteile

Ein Vorteil durch die Optimierung der inaktiven Materialien ergibt sich durch die Gewichtseinsparungen und Bauraumoptimierung. Zudem können sich durch die Materialeinsparungen Kostenvorteile ergeben. Nachteilig können sich etwa durch den Switch von Stahl zu Alu aufgrund ggf. höherer Materialpreise entsprechende Kostennachteile ergeben. Zum Teil ist dies jedoch auch insbesondere bei prismatischen Zellen bereits Stand der Technik.

Aufwand und Produzierbarkeit

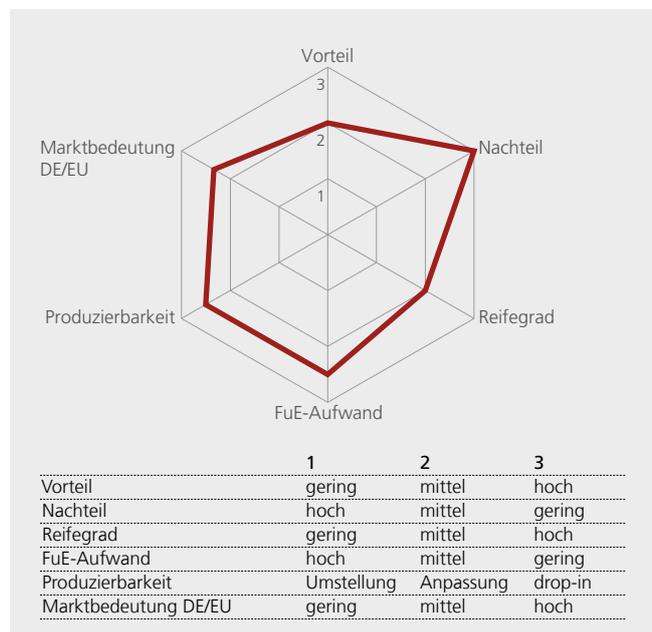
Der Aufwand ist eher als gering bis mittel einzuschätzen. Beispielsweise bei der Verwendung eines Alu-Case anstatt Stahl. Die Produzierbarkeit kann ebenfalls durch einen geringen bis mittleren Aufwand bei der Anpassung erreicht werden.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Volumen-/Gewichts- reduktion inaktiver Materialien (Steigerung Energiedichte)	Gewicht, Bauraum, Kosten	Verarbeitbarkeit, Gewährleistung der Sicherheit	Gering	Prototyp bis Markt (TRL 6–7 oder höher)	Alle
	Kosten	Reduktion von Schicht- bzw. Trägerdicken, Substitution von Materialien	Geringe Anpassungen	Am Markt	

Reifegrad und Markteintritt

Der Reifegrad ist im Allgemeinen weit fortgeschritten und kann in etwa im Bereich der Prototypen/Demonstratoren bis Marktreife angesiedelt werden. Entsprechend sind manche Ansätze auch bereits auf dem Markt.



ZELLDISIGN

[16] STAPELN STATT WICKELN

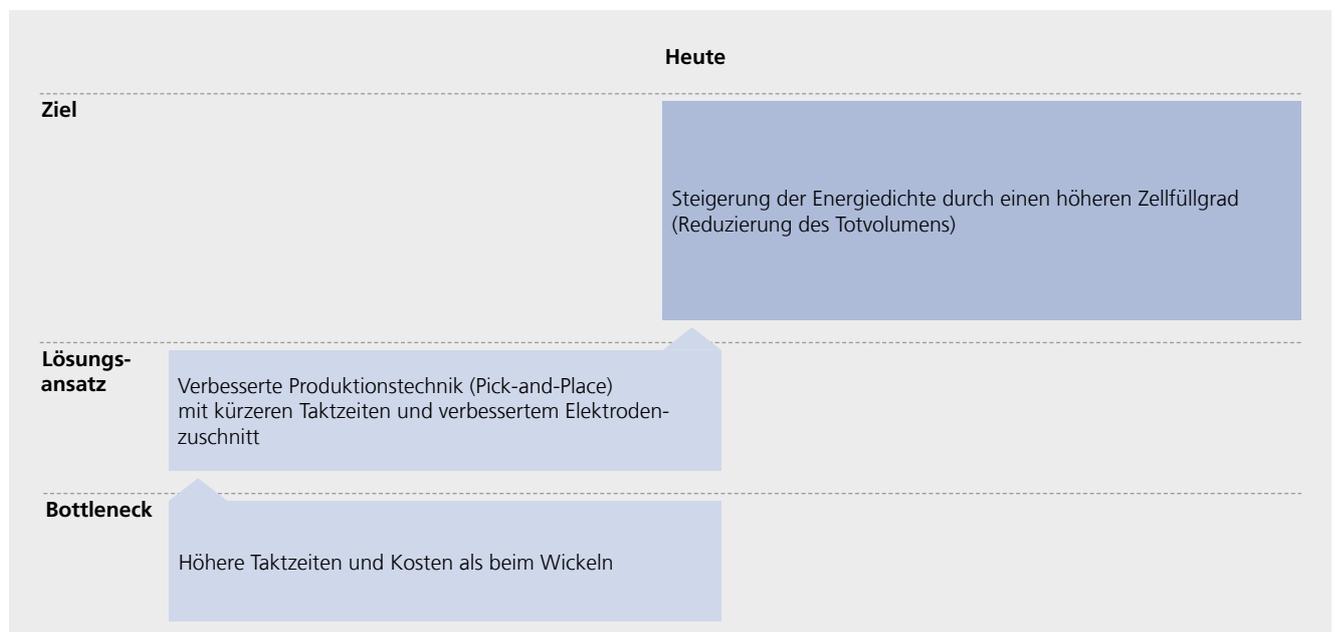
Im Bereich der Gesamtzelle (prismatisch und Pouch) stellt der Übergang vom Wickeln der Zelle hin zum Stapeln der einzelnen Elektrodenpakete eine beachtliche Möglichkeit dar, die Energiedichte aufgrund eines höheren Zellfüllgrades zu steigern. Zur Einführung der Elektrodenpakete in das Zellgehäuse gibt es zwei verschiedene Verfahren: Das Wickeln der Elektrodenpakete und das Stapeln. Das Wickeln wird derzeit noch vorwiegend im Fall der prismatischen und zylindrischen Zellen verwendet, während Pouch-Zellen überwiegend gestapelt werden. Beim Wickeln werden die beschichteten Anoden- und Kathodenfolien durch den Separator getrennt aufgewickelt, während beim Stapeln (Bsp. Z-Stapeln) seitlich einzelne Kathoden- und Anodensheets in den Separator eingefügt werden.

Ziel und geeignete Zellformate

Das Ziel, das mit dem Stapeln verfolgt wird, liegt in einer Erhöhung des Füllgrads durch die Reduktion des Totvolumens im Zellgehäuse. Der Füllgrad ist beim Wickeln z. B. aufgrund der dabei entstehenden Radien vergleichsweise geringer. Der Stapelvorgang ist dabei vor allem für prismatische Zellformate geeignet und auch für Pouch-Zellen.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Als Bottleneck sind dabei jedoch insbesondere die Taktzeiten beim Stapeln zu sehen. Da es sich hierbei um ein Pick-and-Place-Verfahren handelt, dauern diese vergleichsweise etwas länger. Zusätzlich kann der Stapelprozess noch nach den jeweiligen Einzelverfahren unterschieden werden (z. B. Einzelblattstapeln, Z-Falten etc.), bei denen die Taktzeiten nochmals variieren. Unabhängig von der Art des Stapelvorgangs stellen jedoch zusammenfassend die Taktzeiten und die höheren Kosten für das Pick-and-Place-Verfahren die zentralen Herausforderungen dar.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Energiedichte erhöhen	Erhöhter Füllgrad, höhere Lebensdauer	Taktzeit, Prozess- und Anlagenkosten	Mittel	Prototyp bis Markt (>TRL 7)	Pouch, prismatisch
	Mehr Schnittkanten	Produktionstechnik, Elektrodenzuschnitt	Mittlere Anpassungen	Am Markt	

Vorteile und Nachteile

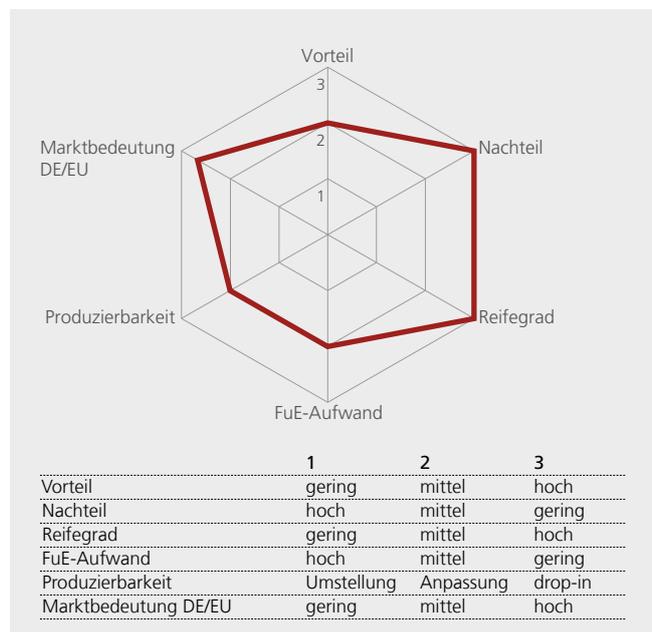
Sofern diese Probleme jedoch zukünftig gelöst werden, wird es durch das Stapeln statt Flachwickeln auch in prismatischen Zellen möglich sein, den Füllgrad zu erhöhen und somit die Energiedichte zu steigern. Zudem wird durch den höheren Füllgrad eine bessere Druckverteilung in der Zelle und ggf. eine leichtere Verarbeitung von dickeren Schichten erreicht, da keine kleineren Biegeradien mehr entstehen. Der mechanische Stress an den Rändern ist beim Stapeln ebenfalls geringer, was sich positiv auf die Lebensdauer der Zelle auswirken kann. Der Nachteil des Stapelverfahrens liegt dagegen in der größeren Zahl der Schnittkanten, ansonsten gibt es jedoch eher keine Nachteile gegenüber gewickelten Zellen.

Aufwand und Produzierbarkeit

Der FuE-Aufwand um diese Probleme zu adressieren, kann als Mittel angesehen werden. Die Produzierbarkeit bedarf noch mittlerer Anpassungen.

Reifegrad und Markteintritt

Der Stapelprozess ist bereits industrialisiert, der Markteintritt entsprechend bereits erfolgt.



THERMOMANAGEMENT

[17] TEMPERIERUNG DER BATTERIE BEIM SCHNELLADEN

Das übergeordnete Ziel auf Systemebene besteht in der bestmöglichen Nutzung der vorhandenen Kapazität (bzw. Optimierung der nutzbaren Kapazität) und in der Minimierung des Overheads in Gewicht und Volumen. Das zentrale Problem hierbei stellt das Thermomanagement dar, das nicht nur zur unterschiedlichen Alterung führt, sondern auch zum Derating der elektrischen Eigenschaften, was entsprechend zu einer niedrigeren Systemleistung führt.

Die FuE-Herausforderungen im Feld des Thermomanagements betreffen das Schnellladen mit gleichzeitiger Optimierung der Lebensdauer [17] und die Homogenisierung der Temperatur im Batteriesystem über die Betriebszeit [18]. Der Fokus der Ziele im Bereich Thermomanagement liegt somit auf einer Steigerung bzw. dem Erhalt der Lebensdauer, insbesondere wenn die Batterie schnell geladen wird und somit hohe Ströme und Temperaturen im Batteriesystem entstehen.

Beim Schnellladen (zukünftig bis zu 350 kW) fließen stärkere Dauerströme über mehrere Minuten durch das Batteriesystem als während der Fahrt (eher 20–40 kW) und führen zu einer hohen thermischen Belastung. Eine Temperierung der Zellen ist daher erforderlich und wird erheblich auf die Lebensdauer des Batteriesystems wirken.

Ziel und geeignete Zellformate

Das Ziel einer geeigneten Temperierung liegt in der Begrenzung der Reduzierung der Lebensdauer sowie in der Vermeidung des Derating auch unter den extremen thermischen Beanspruchungen beim Schnellladen. Hierbei spielt es prinzipiell keine Rolle, welches Format die Zellen besitzen. Alle Formate können schnell geladen werden. Jedoch hat das Format mitunter einen starken Einfluss auf die Stromtragfähigkeit der Zellkontakte und auf die Qualität des thermischen Widerstands.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Schnellladen, Lebensdauer, Derating	Schnellladen ohne die Lebensdauer zu reduzieren	Kosten Ladestation, Lebensdauer Batterie	Sehr hoch	Grundlagenforschung (TRL 1–3)	Alle
	Kosten der Infrastrukturen	Skaleneffekte durch einheitliche Standards und effektive, aktive Kühlung des Packs	Sehr hohe Anpassungen bzw. neue Produktions- konzepte	Kurz- bis mittelfristig	

Bottlenecks und Lösungsansätze

Als wesentlicher Bottleneck sind hierbei die hohen Kosten für die Ladestationen sowie die Definition von Standards für die Ladestationen zu sehen.

Vorteile und Nachteile

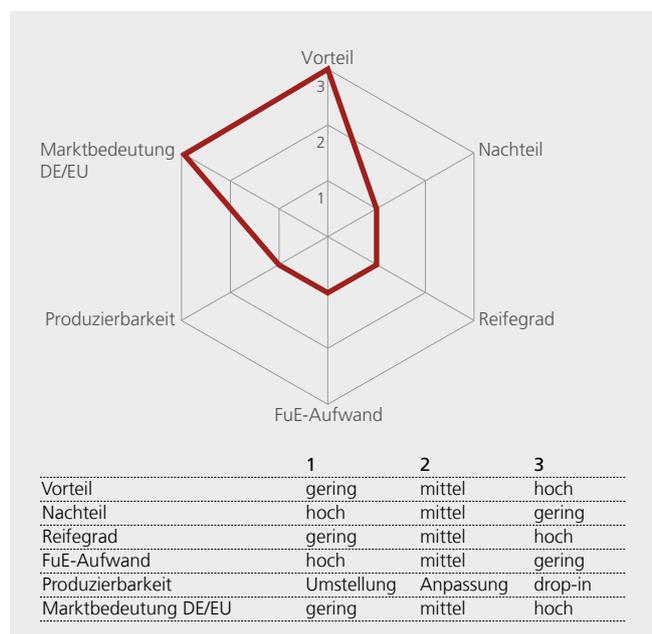
Der Vorteil, der sich daraus ergeben würde, wäre ein schnelleres Laden ohne eine damit einhergehende drastische Reduktion der Lebensdauer. Im Gegenzug müssen jedoch die hohen Kosten für die Erstellung der Infrastruktur berücksichtigt werden.

Aufwand und Produzierbarkeit

Der zu betreibende FuE-Aufwand in Bezug auf das Schnellladen ist mit hoch bis sehr hoch einzuschätzen, insbesondere wenn das System gekühlt werden muss, etwa an Rastplätzen bei denen die Ladestationen häufig genutzt werden. Der Aufwand für die Produzierbarkeit ist ebenfalls als sehr hoch anzusehen bzw. bedarf neuer Produktionskonzepte.

Reifegrad und Markteintritt

Zum heutigen Zeitpunkt kann das Schnellladen bei Fahrzeugen (exklusive Busse) noch im Stadium der Grundlagenforschung gesehen werden. Mit einem Markteintritt könnte jedoch ab 2020 gerechnet werden.



THERMOMANAGEMENT

[18] HOMOGENISIERUNG DER TEMPERATUR

Die Zellen in einem Batteriesystem können während des Betriebs unterschiedliche Temperaturniveaus besitzen. Dies ist vorrangig davon abhängig, wie die Zellen verschaltet und belastet werden. In Abhängigkeit des Temperaturniveaus ändert sich deren Performance mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Jede Zelle hat dabei eine eigene Temperaturverteilung. Durch die Homogenisierung wird jedoch dafür gesorgt, dass diese Temperaturverteilung bei allen Zellen identisch ist und somit die Alterung jeder Zelle in gleichem Maße voranschreitet.

Ziel und geeignete Zellformate

Diese Homogenisierung führt dazu, dass die Alterung der Zellen gleichmäßig vonstatten geht. Über das Batteriesystem betrachtet, verringert dies die Notwendigkeit eines Derating der Zellen und erhöht sowohl die Betriebszeit als auch die Lebensdauer. Zudem wirken sich die durch eine gleichbleibende Zellalterung ebenfalls gleichbleibenden Zellinnenwiderstände positiv auf die Schnell-

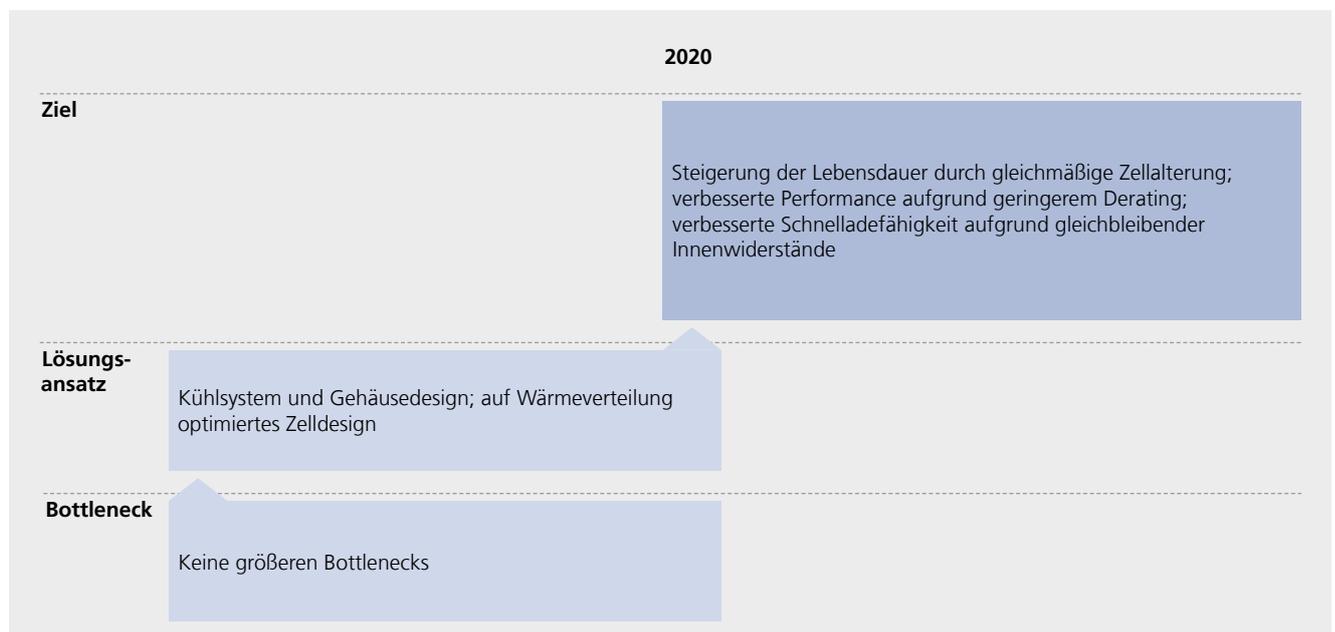
ladefähigkeit aus. Die Homogenisierung der Temperatur ist eher unabhängig vom Zellformat und somit auf alle Formate anwendbar, jedoch mit unterschiedlichem Aufwand.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Es existieren derzeit keine größeren Bottlenecks.

Vorteile und Nachteile

Gelingt letztlich die Homogenisierung der Temperatur, ist der Vorteil sehr hoch, da eine gleichmäßigere Zellalterung erreicht wird. Der Innenwiderstand der Zellen ändert sich somit auch in allen Zellen gleichmäßig und damit auch die Leistungsabnahme- bzw. Leistungsaufnahmefähigkeit der Zellen. Demnach kann der Aufwand des Balancings reduziert werden, da die Zellen nur noch bedingt weiter auseinanderdriften als dies bereits in der Fertigung geschehen ist. Diese Vorteile gehen zu Lasten geringfügig höherer Materialkosten, wobei die absolute Höhe noch nicht abschließend beziffert werden kann. Zudem kann es zu einem höheren Aufwand im Kühlsystem zur damit einhergehenden Wärmeverteilung kommen.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Schnellladen, Lebensdauer, Derating	Gleichmäßige Alterung	Keine größeren Bottlenecks	Gering	Angewandte Forschung bzw. Prototyp/ Demonstrator (TRL 5-6)	Alle
	Kosten, ggf. niedrigere Energiedichte	—	Gegeben	Kurz- bis mittelfristig	

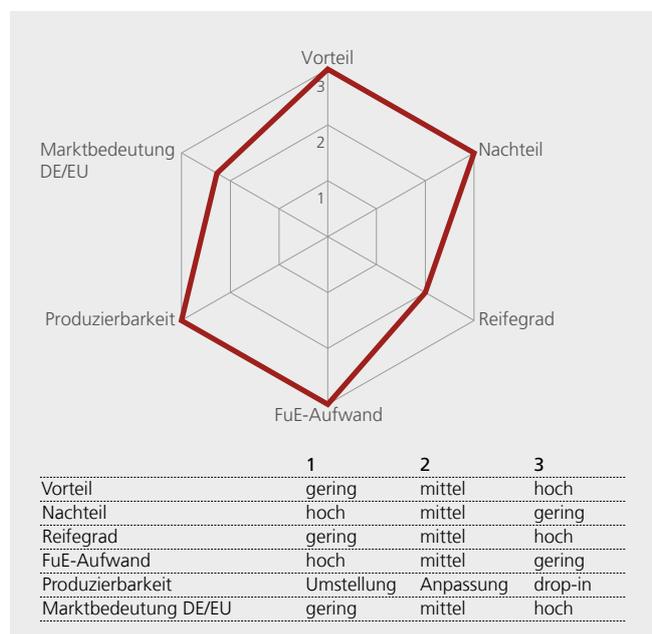
Aufwand und Produzierbarkeit

Verbesserungspotenzial besteht noch in gewissem Maße, bedingt jedoch gleichzeitig teils umfassende Änderungen (z. B. die Direktkühlung von Zellen), wobei der Aufwand jedoch eher gering ist. Die Produzierbarkeit ist gegeben.

Reifegrad und Markteintritt

Mit Blick auf den Reifegrad befindet sich der Ansatz im Bereich der angewandten Forschung bzw. Prototyp/Demonstrator. Es gibt schon einige kommerzielle Anwendungen.

Derzeit verfügt Tesla z. B. bereits über eine Flüssigkeitskühlung mit der 1 C-Laden möglich ist. Hierbei ist jedoch noch umstritten, ob dabei die Lebensdauer beeinträchtigt wird. Der übergeordnete Anspruch dieser Herausforderung liegt daher auf einem gleichmäßigen Kühlen der Zellen ohne Verringerung der Lebensdauer. Dies könnte um das Jahr 2020 realisiert sein. Ein Indiz hierfür sind die Ankündigungen von Porsche bezüglich des Mission E, der schnellladefähig sein soll.



BATTERIEMANAGEMENT

[19] STROMZÄHLER MIT 2–3 PHYSIKALISCHEN MESSBEREICHEN

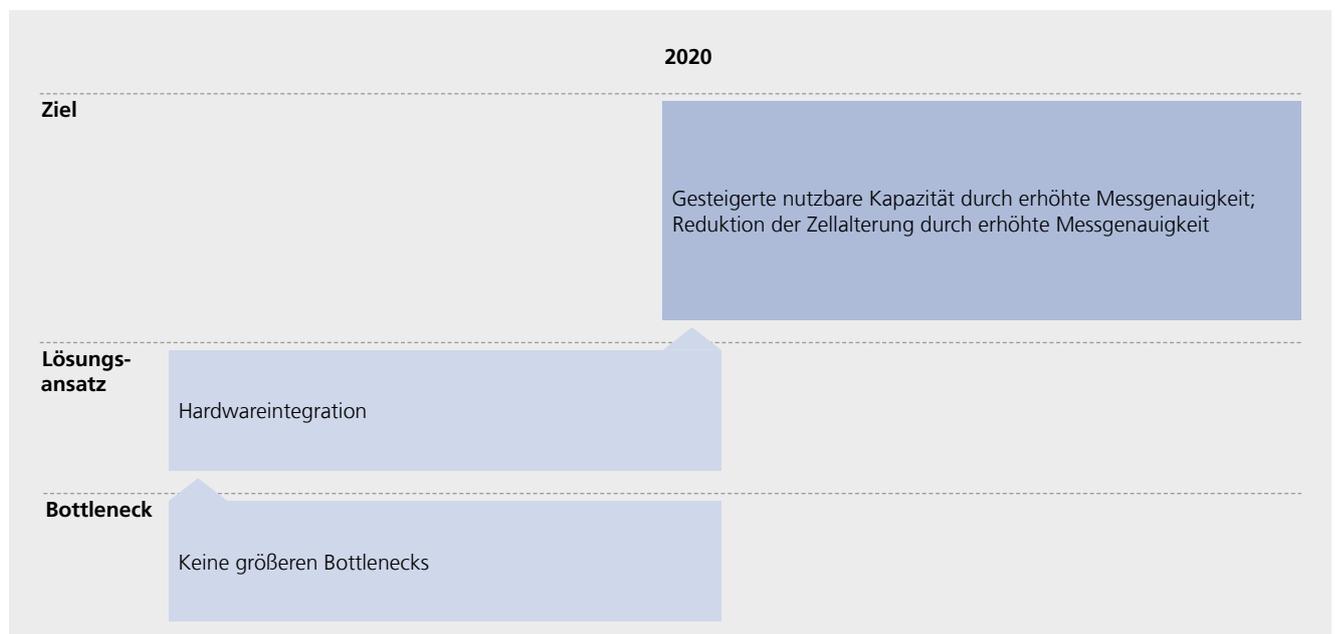
Die Aufgabe des Batteriemanagementsystems (BMS) liegt im intelligenten und optimierten Betrieb der Batterie, wodurch Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Batteriesystems optimiert werden. Aus diesem Grund sind in den einzelnen Batteriemodulen diverse Sensoren zur Temperatur-, Spannungs- und Strommessung eingebracht. Auf dieser Grundlage sind daher vier FuE-Herausforderungen von besonderer Relevanz für das BMS: Eine Gesamtstrommessung mit 2–3 verschiedenen physikalischen Messbereichen [19], die sensorlose Temperaturbestimmung aller Batteriezellen [20], die Vereinbarkeit der Spezifikationen für eine Elektronik für automotive und stationäre Anwendungen [21] und die Online elektrochemische Impedanzspektroskopie [22].

Während die Ansätze [19, 20, 22] auf eine optimierte Erfassung der aktuellen Batterieeigenschaften abzielen, beinhaltet der Ansatz zur Entwicklung einer Elektronik für automotive und stationäre Anwendungen [21] eher einen Life-Cycle-Fokus und eine ökonomischere Zweitnutzung des Systems.

Ziel und geeignete Zellformate

In heutigen Batteriesystemen sind die Stromzähler in der Regel lediglich in der Lage einen physikalischen Messbereich abzudecken.

Durch die Nutzung von Stromzählern mit 2–3 physikalischen Messbereichen können die Ströme genauer gemessen und dadurch der SOC einer Batterie ebenfalls genauer bestimmt werden. Dies ermöglicht eine bessere Ausnutzung der Kapazität bei einer gleichzeitigen Verringerung der Batteriealterung.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Messgenauigkeit, nutzbare Kapazität, Alterung	Genauerer SOC	Keine größeren Bottlenecks	Gering	Prototyp/ Demonstrator (TRL 6–7)	Alle (vorwiegend zylindrisch)
	Kosten	Hardwareintegration	Gegeben	Kurz- bis mittelfristig	

Bottlenecks und Lösungsansätze

Es existieren keine nennenswerten Bottlenecks. Lediglich der Aufwand bezüglich der Hardwareintegration nimmt etwas zu und muss entsprechend möglichst kostenoptimal umgesetzt werden. Zudem sind die Kosten der Elektronik für den Stromzähler zu berücksichtigen.

Vorteile und Nachteile

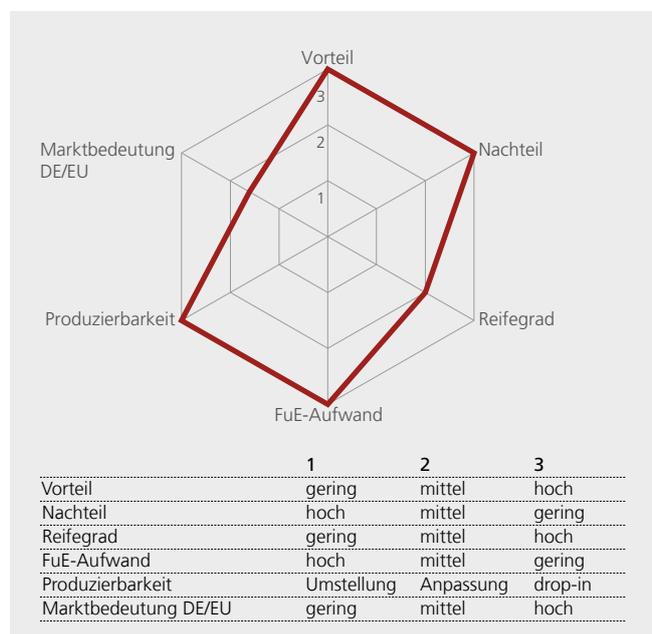
Werden die leicht erhöhten Kosten jedoch akzeptiert oder reduziert, dann ermöglichen es Stromzähler mit 2–3 physikalischen Messbereichen eine genauere Abschätzung der Zustandsbestimmungen der Batterie und speziell des SOC zu erreichen und somit die nutzbare Kapazität zu steigern und die Batteriealterung zu reduzieren.

Aufwand und Produzierbarkeit

Der FuE-Aufwand bei diesem Ansatz ist eher gering und die Produzierbarkeit weitestgehend gegeben.

Reifegrad und Markteintritt

Der Reifegrad kann daher im Bereich des Prototypen/Demonstrators angesehen werden. Stromzähler mit 2–3 physikalischen Messbereichen werden heute teilweise bereits eingesetzt. Ein breiter Markteintritt könnte dann ab 2020 erfolgen.



BATTERIEMANAGEMENT

[20] SENSORLOSE TEMPERATURBESTIMMUNG

Die Messung der Temperatur der Zellen bedingt bis dato eine aufwändige Verkabelung und die direkte physische Verbindung eines Temperatursensors (z. B. NTC) mit den Zellen. Ein neuartiger Alternativansatz verfolgt daher eine Temperaturbestimmung ohne direkte Verwendung eines Temperatursensors.

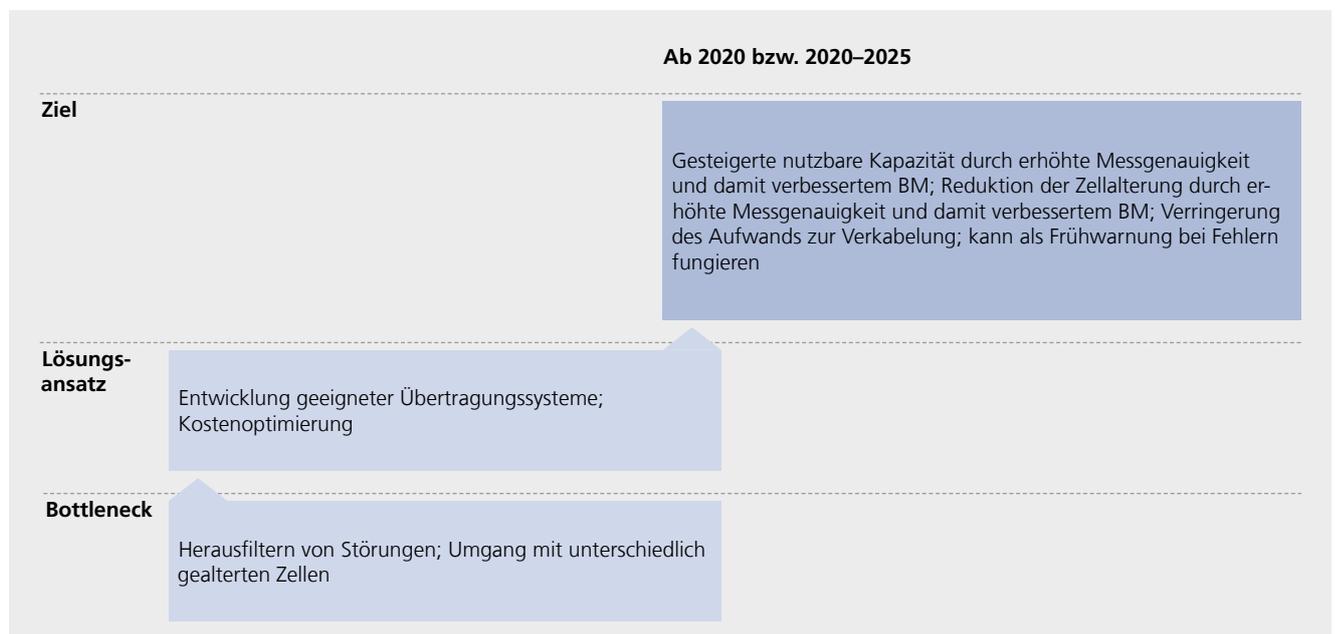
Ziel und geeignete Zellformate

Durch die sensorlose Temperaturbestimmung soll zum einen der Zustand einer einzelnen Zelle genauer bestimmt werden können. Dadurch wird die Anzahl der gemessenen Zelltemperaturen erhöht, welche es wiederum ermöglicht, das Batteriesystem besser zu überwachen, um im Fehlerfall ein auffälliges Verhalten

einer Zelle frühzeitig zu erkennen und einen möglichen thermal Runaway zu verhindern. Zum anderen benötigt der Ansatz keine zusätzliche Verkabelung. Dabei ist die sensorlose Temperaturbestimmung für alle Formate geeignet, jedoch für zylindrische Batteriesysteme mit vielen kleinen parallel verschalteten Zellen weniger relevant, da aufgrund der großen Zellanzahl nur schwer zu bestimmen ist, welche Zelltemperatur letztlich abweicht.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Es gibt noch große Probleme aufgrund der verrauschten Umgebung (z. B. wegen dem Motorenumrichter). Die Störungen müssen herausgefiltert werden und der Umgang mit unterschiedlich gealterten Zellen mit abweichenden Innenwiderständen stellt eine Herausforderung dar.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Messgenauigkeit, nutzbare Kapazität, Alterung, Sicherheit	Frühwarnung bei Fehlern, nutzbare Kapazität, geringere Zellalterung	Störanfälligkeit, funktionale Sicherheit, Zellalterung	Mittel	Grundlagenforschung (TRL 1–3)	Alle
	Kosten	Entwicklung geeigneter Über- tragungssysteme, Kostensoptimierung	Gegeben	Kurz- bis mittelfristig	

Vorteile und Nachteile

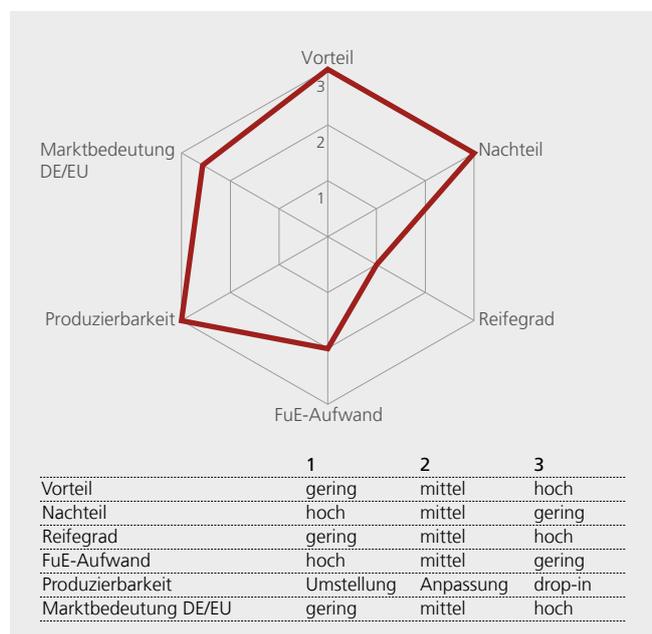
Trotz dieser Bolttlenecks sind die Vorteile einer sensorlosen Temperaturbestimmung hoch. In Bezug auf die Batteriesicherheit stellt die indirekte Bestimmung der Temperatur jeder einzelnen Zelle, über deren Spannung und Verhalten, einen deutlichen Mehrwert dar. Die sensorlose Temperaturbestimmung könnte zudem als Frühwarnung bei Fehlern fungieren. Die Nachteile die eine solche Anwendung mit sich bringen würde sind gering. Es entstehen geringfügige Mehrkosten in der Elektronik da mehr Bauelemente notwendig sind.

Aufwand und Produzierbarkeit

Der FuE-Aufwand für die sensorlose Temperaturbestimmung ist als mittel anzusehen. Die Produzierbarkeit ist dagegen gegeben.

Reifegrad und Markteintritt

Der Reifegrad dieses Ansatzes liegt aktuell noch im Bereich der Grundlagenforschung. Der Markteintritt dürfte daher eher erst mittelfristig zwischen 2020 und 2025 erfolgen.



BATTERIEMANAGEMENT

[21] VEREINBARKEIT VON ELEKTRONIK FÜR AUTOMOTIVE UND STATIONÄRE ANWENDUNGEN

Die Auslegung der Elektronik in heutigen Batteriesystemen erfolgt stark anwendungsfokussiert. Entsprechend ist diese auch immer nur für eine Anwendung zu gebrauchen. Die Auslegung der Elektronik sowohl für die Nutzung im automobilen als auch im stationären Bereich würde es ermöglichen, die Batterie nach deren Einsatz im Automobil auch noch im stationären Bereich zu betreiben, ohne größere Abstriche mit Blick auf die geforderte Performance hinnehmen zu müssen. Dabei müssten zum einen automobilen Anforderungen erfüllt werden wie eine Lebensdauer von mindestens 10 Jahren, 10 000 Betriebsstunden und 300 000 km. Zum anderen Anforderungen für den stationären Bereich wie etwa eine Lebensdauer von 20 Jahren und ein Betrieb über 24 Stunden und 7 Tage die Woche hinweg. Die Art der Zellformate spielt für diesen Ansatz keine Rolle.

Ziel und geeignete Zellformate

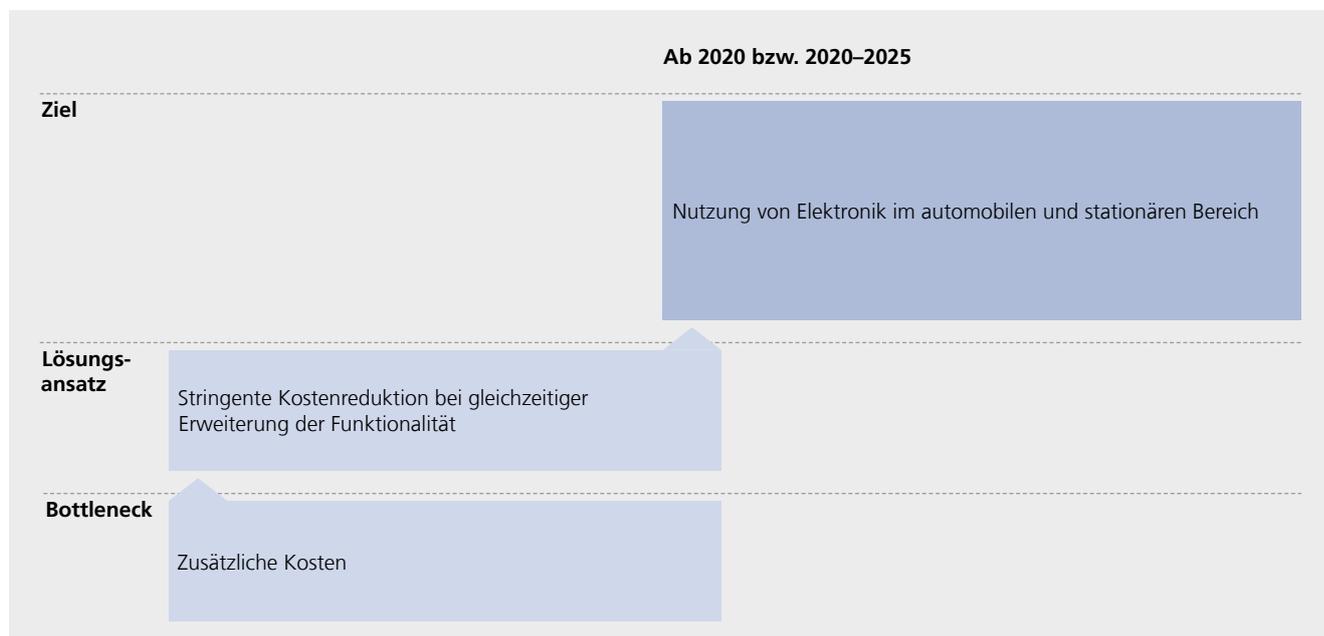
Das Ziel dieses Ansatzes besteht somit in der Verwendung einer Elektronik, die sowohl für automotiv als auch für eine anschließende stationäre Anwendung geeignet ist. Der Ansatz steckt jedoch noch in den Kinderschuhen. Es gibt zwar OEMs, die ihre automotiv Batterien auch im stationären Bereich nutzen, jedoch sind die Batterien hierzu nicht ausgelegt bzw. optimiert.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Als zentraler Bottleneck können hier die zusätzlichen Kosten genannt werden, die dadurch entstehen, dass verschiedene Anforderungen an die Elektronik gestellt werden. Diese sind jedoch als gering einzuschätzen.

Vorteile und Nachteile

Der entstehende Vorteil durch die Vereinbarkeit von Elektronik für automotiv und stationäre Anwendungen kann als Mittel eingestuft werden, unter der Voraussetzung, dass 2nd Life als



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Nutzung im mobilen und stationären Bereich	2nd Life möglich	Kosten, Anforderungen	Niedrig	Grundlagenforschung (TRL 1–3)	Alle (vorwiegend zylindrisch)
	Kosten	Stringente Kosten- reduktion bei gleich- zeitiger Erweiterung der Funktionalität	Gegeben	Kurz- bis mittelfristig, abhängig von 2nd Life	

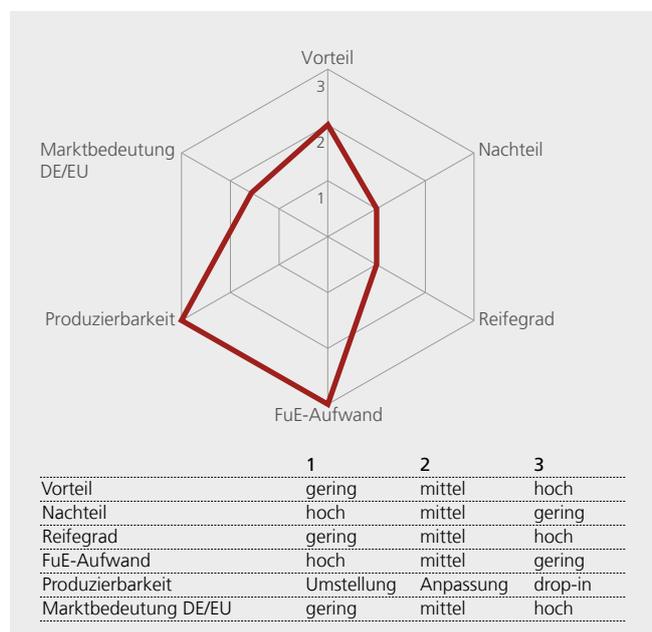
Anwendung zukünftig auch relevant wird. Dies ist derzeit jedoch noch unklar, da quasi alle vorhandenen Studien davon ausgehen, dass die zukünftige Mobilität vergleichbar mit der heutigen Mobilität sein wird. Diese Annahme kann jedoch in Frage gestellt werden, wenn zukünftig hoch automatisierte Fahrzeuge eingesetzt werden. Als Nachteil können die hohen Kosten angesehen werden. Wie ausschlaggebend diese jedoch letztlich sind, ist abhängig vom jeweiligen 2nd-Life-Geschäftsmodell.

Aufwand und Produzierbarkeit

Der Aufwand ist eher gering. Die Produzierbarkeit ist zudem gegeben.

Reifegrad und Markteintritt

Der Ansatz befindet sich eher noch im Bereich der Grundlagenforschung. Der Zeitpunkt des Markteintritts ist stark abhängig von dem Zustandekommen von Geschäftsmodellen, die auf 2nd-Life-Konzepten beruhen. Der Ansatz dürfte daher frühestens zwischen 2020 und 2025 die Marktreife erreichen.



BATTERIEMANAGEMENT

[22] ONLINE ELEKTROCHEMISCHE IMPEDANZSPEKTROSKOPIE (EIS)

Die elektrochemische Impedanzspektroskopie stellt eine zerstörungsfreie, nicht-invasive Analysemethode zur Charakterisierung frequenzabhängiger elektrischer Eigenschaften eines elektrochemischen Systems dar.

Ziel und geeignete Zellformate

Die analysierten Spektren erlauben es, Rückschlüsse über die Beweglichkeit der Ladungsträger zu ziehen und somit direkt auf den Zellzustand. Dies erlaubt eine verbesserte Steuerung, wodurch die nutzbare Kapazität erhöht werden kann und gleichzeitig die Batteriealterung verringert wird. Der Ansatz sieht es vor, diese Messungen online durchzuführen. Die Online EIS ist dabei für alle Formate geeignet.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Der Bottleneck bzw. die Schwierigkeit besteht darin, die Funktionalität des Online EIS nicht nur beim Laden, sondern auch während des Fahrens zu gewährleisten, da durch Störungen vom Umrichter die Messgenauigkeit stark beeinflusst wird.

Vorteile und Nachteile

Die Vorteile, die sich bei Lösung dieses Bottlenecks ergeben, sind hoch, da eine genauere Zustandsbestimmung der Batterie möglich ist (SOC, SOH_R und SOH_Q). Zudem ermöglicht die EIS eine Intelligenz auf Einzelzellebene, um z. B. bei einer Lagerung Auskunft zur Alterung zu liefern oder aber Informationen über den Zellzustand während der Batterie-Assemblierung zu liefern. Dadurch wird der Aufwand für Tests beim Pack- und Modul Aufbau verringert.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Messgenauigkeit, nutzbare Kapazität, Alterung, 2nd Life	Genauerer Zustand des Systems bekannt	Funktionalität des Online EIS beim Fahren	Mittel	Grundlagenforschung/ angewandte Forschung (TRL 1–5)	Alle (vorwiegend zylindrisch)
	Kosten	Erhöhung Mess- genauigkeit durch Störungsreduktion durch Umrichter	Mittlere Anpassungen	Mittel- bis langfristig	

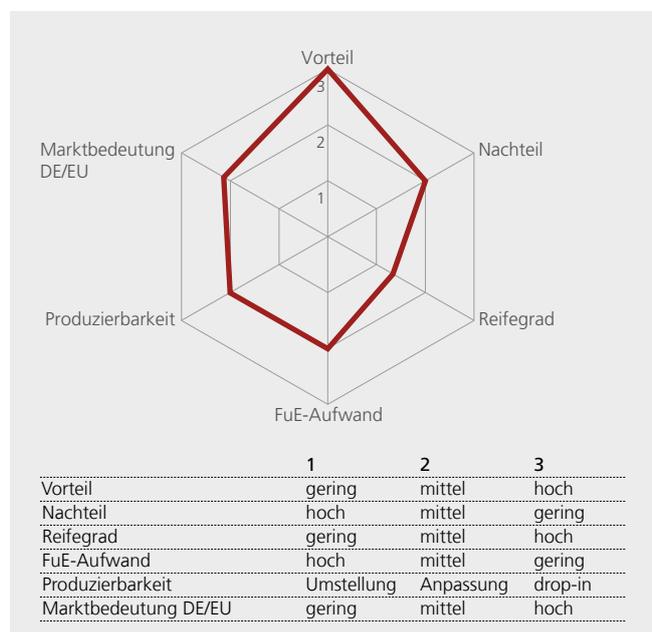
Zudem kann zum Ende der Nutzungsdauer hin deren Restwert oder deren Eignung für eine 2nd-Life-Anwendung eingeschätzt werden. Nachteilig wirken sich jedoch die höheren Kosten durch die Elektronik aufgrund der hierbei geforderten Genauigkeit aus.

Aufwand und Produzierbarkeit

Der Aufwand ist als mittel einzustufen, ebenso wie die Anforderungen zur Produzierbarkeit.

Reifegrad und Markteintritt

Derzeit befindet sich das Verfahren noch im Bereich der Grundlagenforschung bis angewandten Forschung. Das Online EIS dürfte vermutlich erst langfristig zwischen 2025 und 2030 die Marktreife erreichen.



GEHÄUSE UND SONSTIGE ANSÄTZE AUF BATTERIESYSTEMEBENE

[23] EINSATZ NEUER MATERIALIEN

Das Gehäuse des Batteriesystems umfasst und schützt die innenliegenden Komponenten des Batteriesystems als auch nach außen hin das Fahrzeug. FuE-Herausforderungen in diesem Bereich stellen der Einsatz neuer Materialien dar [23], um das Gehäuse leichter oder volumetrisch kleiner zu gestalten, sowie die konstruktive und werkstoffseitige Optimierung der Battery Junction Box [25], durch die das gleiche Ziel verfolgt wird. Der Einsatz neuer Materialien für oder innerhalb des Gehäuses umfasst eine große Bandbreite an möglichen Materialarten wie beispielsweise Mica, Super Thermische Isolatoren, Leichtbaustoffe oder Phase Change Materials für die Wärmedämmung.

Ziel und geeignete Zellformate

Das Ziel, das mit dem Einsatz dieser neuen Materialien verfolgt wird, liegt unabhängig vom Material in einer Reduzierung des Overheads sowohl im Gewicht als auch im Volumen. Eine solche Reduzierung ermöglicht es schließlich, die Reichweite des Fahrzeugs zu erhöhen.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Es sind derzeit keine gravierenden Bottlenecks zu erkennen. Dennoch sind vor einer Markteinführung noch eine Vielzahl an Tests notwendig, um die Vorteilhaftigkeit des Materials je nach Typ der Zelle und Anwendung zu untersuchen und zu demonstrieren.

Vorteile und Nachteile

Die resultierenden Vorteile sind als mittel bis hoch anzusehen, da die Materialien einen positiven Einfluss auf die Reichweiten-erhöhung und Alterung besitzen. Nachteilig könnten sich einzig die geringen zusätzlichen Kosten auswirken.



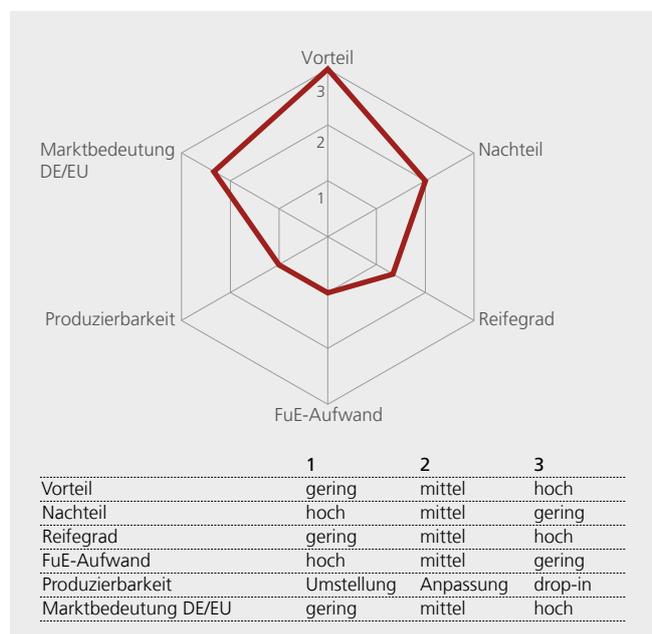
ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Reduzierung von Gewicht und Volumen	Reichweiteerhöhung, geringere Alterung	Keine größeren Bottleneck	Hoch bis sehr hoch	Grundlagenforschung bis angewandte Forschung (TRL 1–5)	Hauptsächlich zylindrisch und Pouch
	Kosten	Materialentwicklung und Design	Neue Produktions- konzepte	Am Markt	

Aufwand und Produzierbarkeit

Der zu betreibende Aufwand zur Materialentwicklung ist abhängig von dem spezifischen Fall. Er kann tendenziell jedoch als hoch bis sehr hoch eingestuft werden. Ebenso müssen teilweise zur Herstellung der Produzierbarkeit mitunter neue Produktionskonzepte entwickelt werden.

Reifegrad und Markteintritt

Die meisten der genannten Materialien befinden sich derzeit noch in der Vorentwicklung. Dennoch befinden sich manche Materialien auch bereits auf dem Markt, sodass die Markteinführung einzelner Materialien bereits erfolgte.



GEHÄUSE UND SONSTIGE ANSÄTZE AUF BATTERIESYSTEMEBENE

[24] VERÄNDERUNG DER SYSTEMSPANNUNG (48 V, 800 V)

Eine weitere FuE-Herausforderung auf Systemebene zielt auf eine Auslegung der Batteriespannung auf 800V ab. Durch diese Steigerung der Spannung soll die Performance des Batteriesystems bzgl. Leistungsaufnahme und -abgabe spürbar verbessert werden. Alternativ dazu wird momentan ein Trend in Richtung niedriger Systemspannungen, d. h. 48V beobachtet.

Ziel und geeignete Zellformate

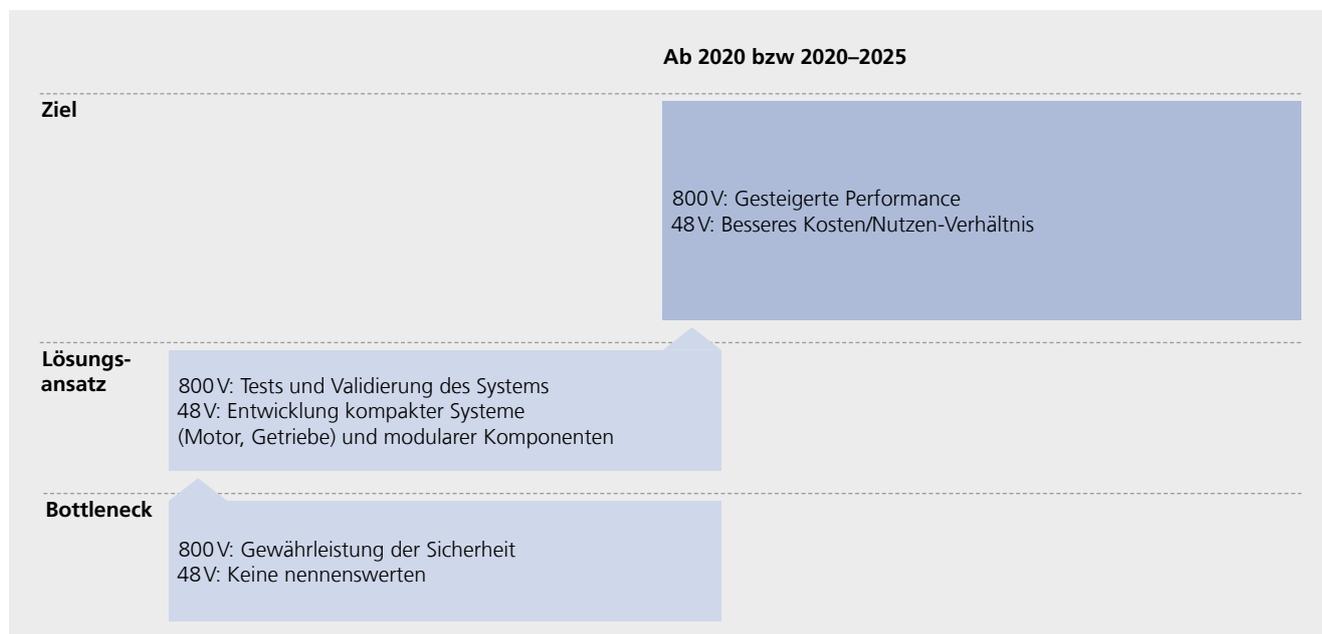
Das Ziel, das mit der Spannungserhöhung verfolgt wird, liegt in der dadurch gesteigerten Performance und dem Komfort des Batteriesystems. Dabei ist der Ansatz für alle Zellformate geeignet. Die Spannungsreduktion auf 48V zielt auf eine Kostenreduktion bei der Batterieperipherie und dem BMS ab.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Der Bottleneck zur Serienreife von 800V-Systemen besteht in der Gewährleistung der Sicherheit, da ein Teil der Komponenten erst noch entwickelt und deren Sicherheit entsprechend nachgewiesen werden muss. Leistungselektronik für 48V-Systeme ist prinzipiell vorhanden, jedoch müssen noch Herausforderungen durch die höheren Stromstärken gelöst werden.

Vorteile und Nachteile

Der Vorteil bei der Verwendung von 800V-Systemen liegt in einer gesteigerten Performance des Batteriesystems durch mehr Leistung und Bremskraft, die vor allem für Anwendungen im High-Performance und Premium-Segment relevant ist. Der entstehende Nachteil durch diese Maßnahme sind die gesteigerten hohen Kosten. Zeitlich gesehen wird die Entwicklung des 800V-Systems parallel mit dem 400V- oder dem 600V-System erfolgen.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
800 V: Gesteigerte Performance 48 V: Besseres Kosten/Nutzen-Verhältnis	800 V: höhere Performance 48 V: Kosteneffizienz	800 V: Gewährleistung der Sicherheit 48 V: Keine nennenswerten	800 V: Hoch 48 V: Mittel	Prototyp/ Demonstrator (TRL 6–7)	Alle
	800 V: Kosten 48 V: Antriebsleistung	800 V: Tests und Validierung des Systems 48 V: Entwicklung kompakter Systeme, modulare Komp.	Mittlere Anpassungen	Kurzfristig	

Hauptvorteil von 48V-Systemen sind die niedrigeren Kosten bei der Autoelektronik und im Antriebsstrang. Wesentliche Nachteile ergeben sich jedoch aus den hohen Stromstärken, welche sich tendenziell negativ auf die Leistungseffizienz des Gesamtsystems auswirken und einen höheren Aufwand bei der Leistungsübertragung erzeugen.

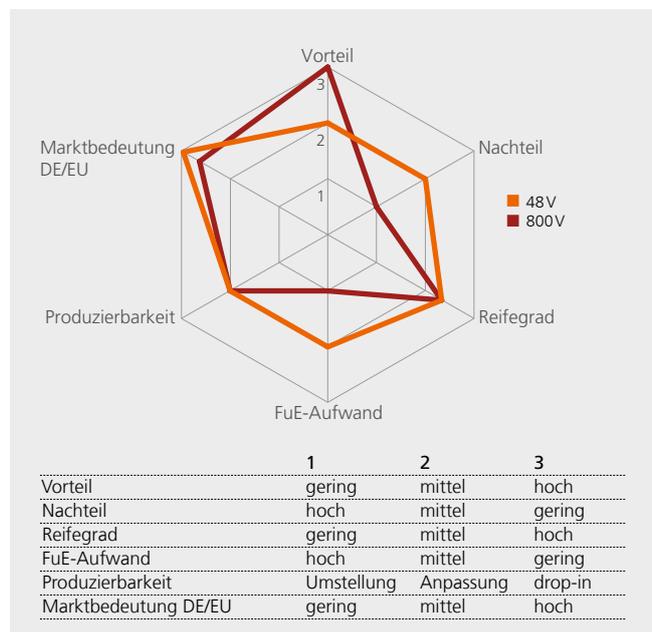
Aufwand und Produzierbarkeit

Der zu betreibende FuE-Aufwand für 800V-Systeme kann als sehr hoch eingestuft werden. Es sind voraussichtlich mittlere Anpassungen für die Produzierbarkeit notwendig.

48V-Antriebe unterscheiden sich grundlegend von 400V- bzw. 600V-Systemen. Es wird davon ausgegangen, dass 48V-Systeme nicht in bisherigen xEV-Modellen eingesetzt werden. Der FuE-Aufwand wird als mittelmäßig hoch eingeschätzt.

Reifegrad und Markteintritt

Bisher sind bereits erste 800V-Prototypen vorhanden, jedoch ist noch keine Serienfähigkeit erreicht, womit die Reife im Bereich Prototyp/Demonstrator liegt. Die Marktreife dürfte kurzfristig erreicht werden können. Der Markteintritt von Batteriesystemen mit einer höheren Spannung von 800V dürfte bis zum Jahr 2020 erfolgen. Als Indikator hierfür dienen die Ankündigungen von Porsche für die Mission E 800V-Schnellladesäulen zu errichten. Ein Einsatz von 48V-Systemen wird insbesondere für industrielle Anwendungen (Transport, Flurförderfahrzeuge) sowie für Kleinfahrzeuge (Roller, kleine xEV insb. PHEV) gesehen. Erste Prototypen und Kleinserien sind bereits verfügbar (z. B. Bosch).



GEHÄUSE UND SONSTIGE ANSÄTZE AUF BATTERIESYSTEMEBENE

[25] OPTIMIERUNG BATTERY JUNCTION BOX UND NEUE LÖSUNGEN ALS SCHÜTZE

Die Battery Junction Box (BJB) beinhaltet elektrisch-mechanische Komponenten wie z. B. BMS oder auch Schütze/Relais. Deren konstruktive und werkstoffseitige Optimierung (z. B. All-solid-state-Relais) stellt den Fokus dieses Ansatzes dar.

Ziel und geeignete Zellformate

Das Ziel der Optimierung der BJB liegt in der Reduktion des Gewichts und des benötigten Volumens, aber auch der Kosten. Der Ansatz ist dabei für alle Formate geeignet und unabhängig von der Zellgröße bzw. dem Zellformat.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Der Bottleneck, den es hierbei zu lösen gilt, liegt in der Gewährleistung der Sicherheit. So ist beispielsweise bei einem mechanischen Kontakt einfach sicherzustellen, dass dieser geöffnet ist, im Gegenteil zu einem Halbleiterschalter.

Vorteile und Nachteile

Der Lösung des Bottlenecks steht eine große Kosteneinsparung für die Komponenten der BJB sowie eine Reduktion des Volumens und Gewichts der BJB bei keinen erkennbaren Nachteilen gegenüber.

Aufwand und Produzierbarkeit

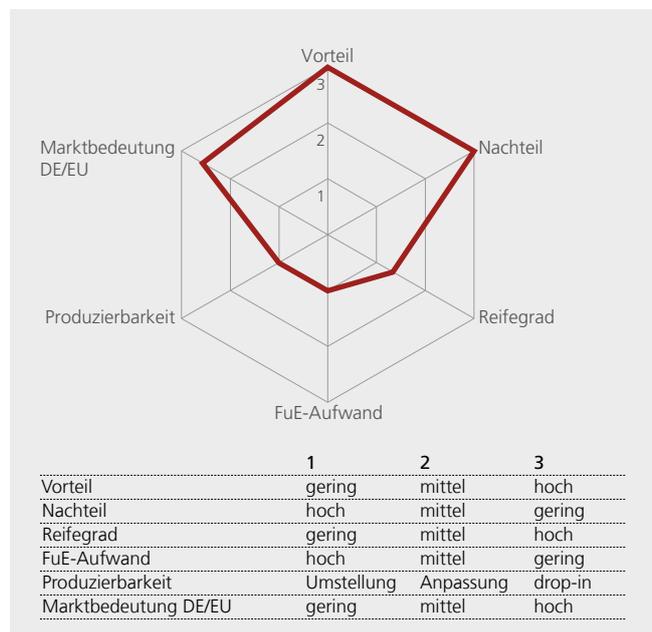
Der Aufwand, den es zur Lösung dieses Bottlenecks bedarf, ist jedoch als hoch einzuschätzen. Für die Herstellung werden voraussichtlich neue Produktionskonzepte notwendig sein.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Reduktion des Gewichts und des benötigten Volumens, Kosten	Kostenreduktion, Volumen- und Gewichtsreduktion	Sicherheit garantieren	Hoch	Grundlagenforschung bis angewandte Forschung (TRL 1–5)	Alle
	–	Konstruktive, werkstoffseitige Optimierung des Schaltsystems und Ausstattung mit Sicherheitselementen	Neue Produktionskonzepte	Kurz- bis mittelfristig	

Reifegrad und Markteintritt

Die Forschung diesbezüglich befindet sich noch in den Anfängen zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung. Der Markteintritt könnte mittelfristig zwischen den Jahren 2020 bis 2025 erfolgen. Bisher steht dem Durchbruch noch der Bottleneck zum Thema Sicherheit im Weg.



PERSPEKTIVEN ZUKÜNFTIGER BATTERIETECHNOLOGIEN

WARUM IST FuE AN TECHNOLOGIEALTERNATIVEN WICHTIG?

Der Forschungs- und Entwicklungsfokus liegt heute auf Lithium-Ionen und künftigen lithiumbasierten Batterien, da sich diese Hochenergie-Batterietechnologien am besten für die extrem fordernden Anwendungen in Elektromobilen und tragbaren Geräten eignen. Durch die mit der Marktdiffusion voranschreitende Kostendegression ergeben sich aber auch Kostenvorteile der Hochenergie-Batterien, welche somit auch für stationäre Anwendungen attraktiv sind. Dennoch existiert ein breites Portfolio bereits etablierter Energiespeichertechnologien, welches z. B. im Fall der stationären Anwendungen typischerweise anhand der EnergiespeichergroÙe (in Wh) und Leistung (in W) sowie der typischen Lade-/Entladedauer (in Zeit) klassifiziert wird.

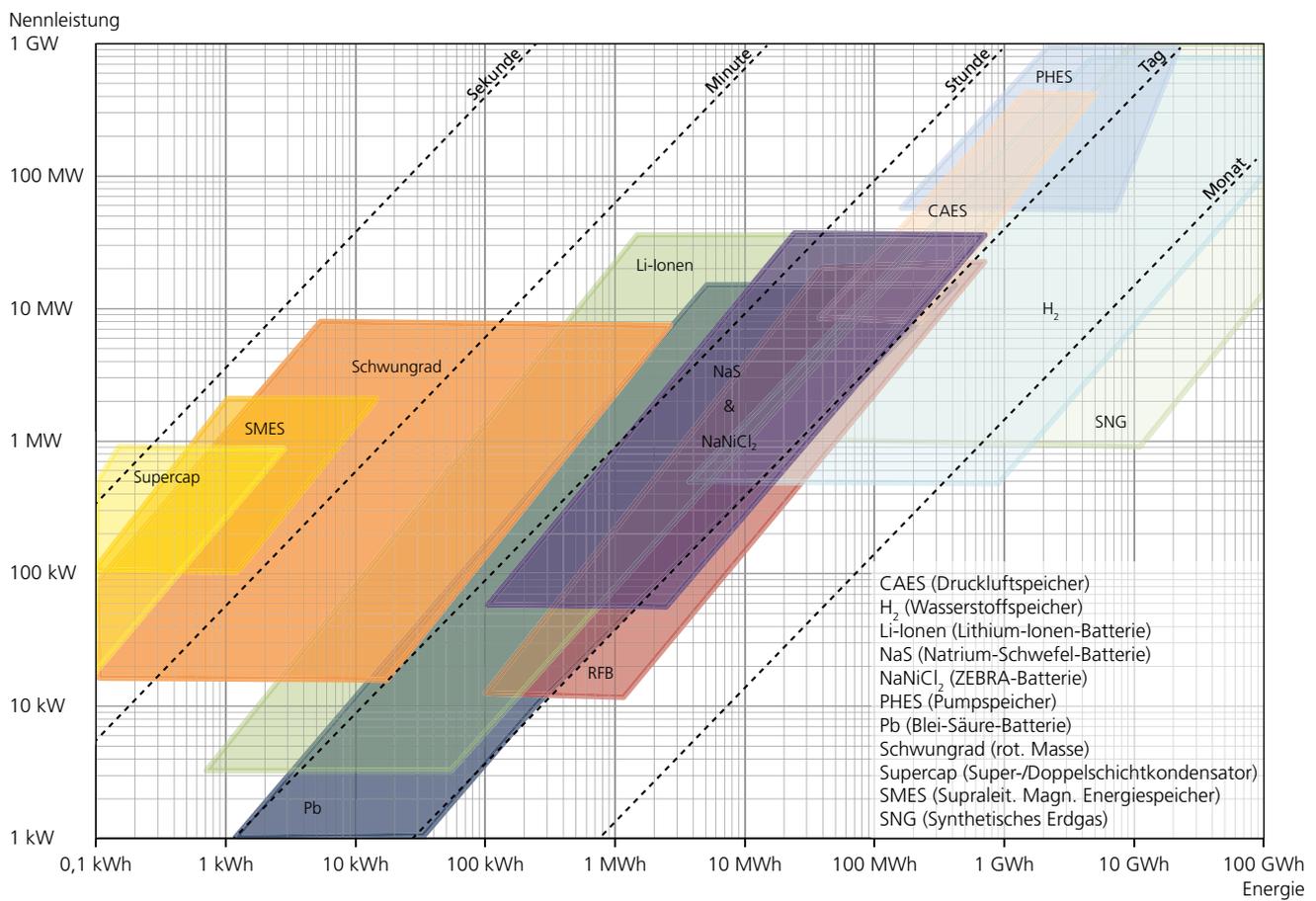
Während Batterien für tragbare Anwendungen fest etabliert sind und das Portfolio je nach Anwendung zu einer Auswahl bestimmter Zellchemien und -formate von Lithium-Ionen-Batterien oder einzelnen weiteren Batterietechnologien wie Pb-Batterien, Zn-Luft etc. führt, so richten sich für Elektroautos die Erwartungen heute praktisch ausschließlich an Hochenergie-Lithium-basierte Batterien, um die fossilen Kraftstoffe und den Verbrennungsmotor zu ersetzen. Für Mobilitätskonzepte mit höherer Reichweite und Gewicht (Lkw für Langstrecken, Übersee-Schifffahrt, Passagierflugzeuge etc.) wird dabei weiterhin nach geeigneten Alternativen wie Oberleitung-Lkws, Wasserstoff oder sonstige synthetische Kraftstoffe (Power to Liquid – PtL) gesucht.

Für stationäre Energiespeicher hingegen ist eine große Breite relevanter SpeichergroÙenklassen zu unterscheiden, welche von kleinen (z. B. dezentralen) Energiespeichern unterhalb 10 kWh bis zu sehr großen (und zentralen) Energiespeichern jenseits 1 GWh reichen können und je nach Anwendungsbereich mehrere denkbare Speicheroptionen bieten (siehe Abbildung). Aber auch hier entscheiden letztlich in der Regel energiewirtschaftliche Betrachtungen, welche insbesondere durch Kostenberechnungen über die gesamte Lebensdauer der Anwendung (sog. levelized cost of electricity LCOE) vorgenommen werden.

Somit werden Energiespeichertechnologien heute sehr stark mit stationären Systemen assoziiert, in welchen die Marktpotenziale für die meisten Speicherlösungen gesehen werden. Jedoch nehmen auch in diesen Anwendungsbereichen Lithium-Ionen-Batterien eine zunehmende Bedeutung und damit Wachstum und Marktanteile ein. Während der gesamte Energiespeichermarkt um 2020 je nach Marktprognose in der Dimension von bis zu 10 Mrd US Dollar oder mehr eingeschätzt wird (LIB, Pb, Batterien gesamt sind dabei als Teilmärkte mit Blick auf ESS dargestellt), so wird der Markt für LIB-Zellen um 2020 bei 20 bis 60 Mrd US Dollar und durchschnittlich 12 bis 26 Prozent Wachstum liegen, der von Pb-Batterien bei 40 bis 50 Mrd US Dollar und wenigen Prozent Wachstum (ggf. bereits stagnierend) und der gesamte Batteriemarkt voraussichtlich bei mindestens 60 bis über 100 Mio US Dollar. Somit werden Lithium-Ionen-Batterien mittelfristig nicht nur den Markt der elektrochemischen Speicher sondern aller Energiespeicher zunehmend dominieren.

So groß die Potenziale dieser Technologie sind, ebenso groß ist auch die Verantwortung alternative Lösungsoptionen zu schaffen. Sicherlich gelten Lithium-Ionen-Batterien dabei als Benchmark, jedoch sind ebenso wie die Fragen bzgl. der Realisierbarkeit technologischer Durchbrüche zukünftiger Batterietechnologien und deren tatsächlich erzielbarer Leistungsparameter (USP: Unique Selling Points) auch die Fragen künftiger Anforderungen an Energiespeicher in unterschiedlichen Anwendungen noch unklar. So dürften zukünftig Nachhaltigkeitsaspekte wie Ressourcenverfügbarkeit, Recyclierbarkeit, energieeffiziente und CO₂-neutrale Produktion und damit auch Geschäftsmodelle der Zweit- oder Mehrfachnutzung eine immer wichtiger werdende Rolle spielen und letztlich auch zu kostenrelevanten Faktoren werden. Aktuell fokussieren die akademischen Forschungsaktivitäten in Deutschland sehr stark auf einer Vielzahl möglicher alternativer Batterietechnologien (wie Metall-Luft, Metall-Schwefel, Na-, Mg-, Al-Ionen, Dünnschicht- und besonders Feststoffbatterien). Solange keine physikalischen Gründe gegen die mögliche Nutzbarmachung solcher Technologien sprechen, ist daher die Arbeit an Alternativen vor dem genannten Hintergrund immer sinnvoll und wichtig.

Portfolio etablierter Energiespeichertechnologien am Beispiel der für stationäre Anwendungen relevanten Energiespeichergröße (in Wh), Nennleistung (in W) und typischen Lade-/Entladedauer (in Zeit)³⁸



LANGFRISTPERSPEKTIVEN ALTERNATIVER BATTERIETECHNOLOGIEN

Bei der Bewertung der Langfristperspektiven alternativer, zukünftiger Batterietechnologien wird das Portfolio bereits weitgehend ausgereifter Batterietechnologien wie z. B. Hochtemperatur Na-S, NaNiCl, Pb-Batterien etc. ausgeklammert. Einzig etablierte LIB (hochstrom, langlebig, hochenergie) werden als Benchmark aufgeführt. Ebenso sind die zukünftigen Entwicklungen für lithiumbasierte bis Li-Feststoffbatterien (vgl. Roadmap Hochenergie-Batterien 2030+, Seite 22/23) erweitert um die Langfristperspektiven jenseits 2030 dargestellt (siehe Seite 86/87).

Die Auswahl, Festlegung und vertiefende Diskussion neuer Batterietechnologie-Entwicklungen ist das Ergebnis eines Workshops mit Batterieexperten vom 18.7.2017 in Frankfurt am Main sowie ergänzenden Interviews und eigenen Recherchen des Fraunhofer ISI. Zielsetzung war es, solche Batterieentwicklungen auszuwählen, welche physikalisch, technisch und anwendungsbezogen prinzipiell als sinnvolle und relevante Technologiealternativen zu bestehenden Energiespeicherlösungen eingeschätzt werden und diese möglichst realistisch nach heutigem Verständnis zu bewerten.

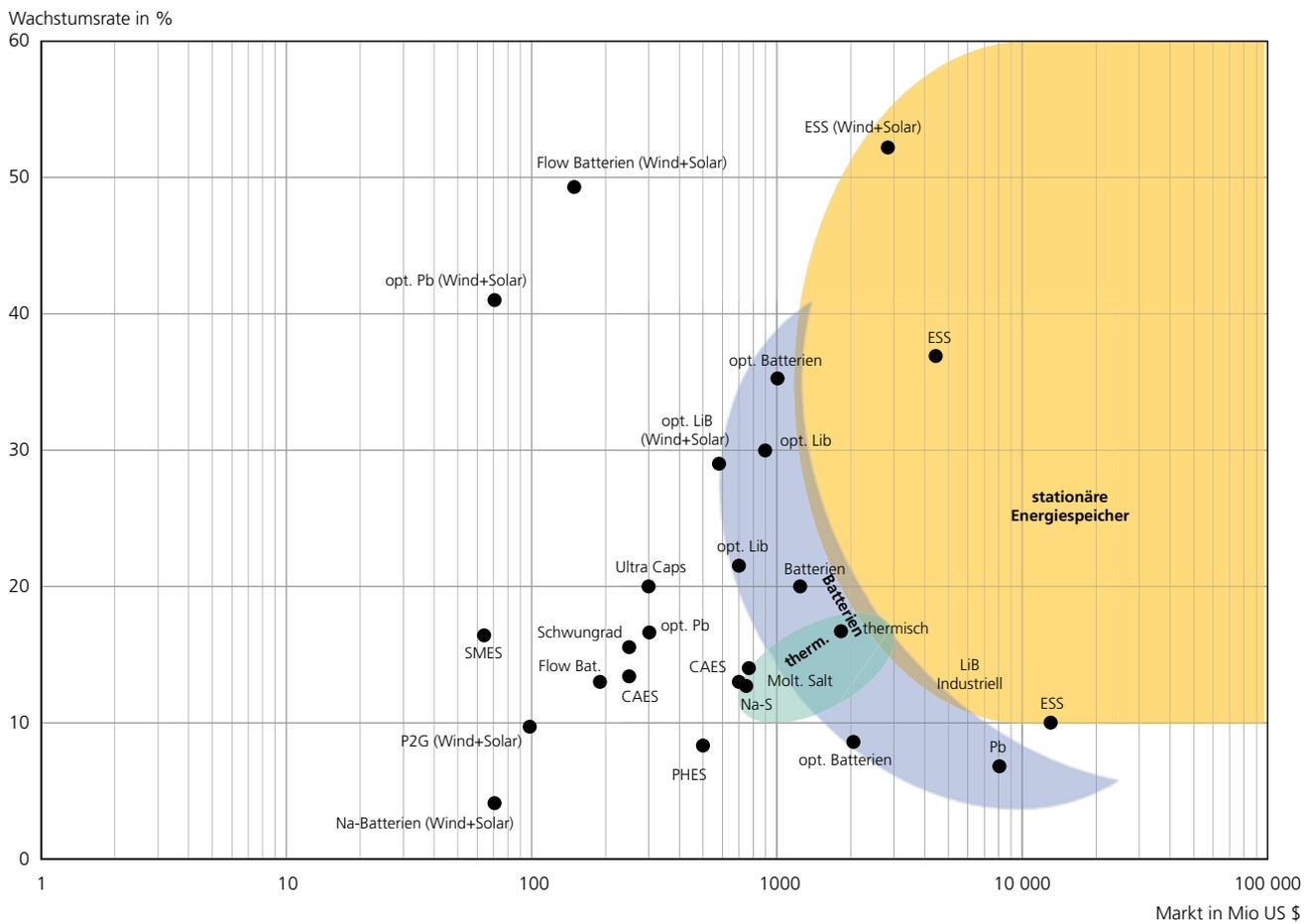
Da die identifizierten Technologien in der Regel generell disruptive Lösungen erfordern wurde einerseits der zeitliche Bewertungsrahmen neben kurzfristig (bis 2020), mittel- bis langfristig (bis 2030) sowie langfristig (bis 2040) jenseits 2040 perspektivisch bis 2050 erweitert (Vision). Mit der Überlegung, dass es ausgehend von der FuE selbst bei Überwindung eines disruptiven Bottlenecks einige Jahre bis zur Entwicklung zur Marktreife inklusive industrieller produktionstechnischer Umsetzung und weitere Jahre bis zur anwendungsspezifischen Validierung und Systemauslegung bedarf, können solche Technologien mit disruptiven Bottlenecks eigentlich nicht vor 2030 Marktreife erlangen und sind daher frühestens zu diesem Zeitpunkt verortet. Die Einschätzung der Langfristperspektiven erfolgt daher ausgehend vom heutigen Forschungsstand explorativ.³⁹

Die Kennzeichnung mit einem entsprechenden Symbol (Blitz) soll die Unsicherheit signalisieren, ob eine disruptive Lösung tatsächlich gefunden wird. Sollte dies aber der Fall sein, so können sich ggf. Folgewirkungen für weitere, andere Technologieentwicklungen ergeben. Eine Einschätzung der mit der jeweiligen Technologie generell als praktisch erreichbar eingeschätzter Parameter ist unter Vision angegeben.

Anhand dieser Parameter (i.d.R. gravimetrische Energiedichte und Zyklen) zeigt sich, dass sich selbst bei Technologien mit höheren erzielbaren gravimetrischen Energiedichten der Energiedurchsatz (die Kombination aus Energiedichte und Zyklenzahl) nicht gegenüber LIB bzw. den bis dahin optimierten Hochenergie-Li-basierten bzw. Li-Feststoffbatterien verbessert. Unter den aktuell an Hochenergie-Zellen für den automotive Bereich gestellten Anforderungen wären die künftigen Batterietechnologien somit nicht für diese Anwendungen geeignet, außer es sollten sich diese Anforderungen ändern. Die Batterietechnologien bringen in der Regel einen Mehrwert bzgl. der Kosten und Ressourcenverfügbarkeit und werden aus heutiger Sicht als potenzielle Technologien für stationäre Anwendungen (ESS) oder spezielle Anwendungen gesehen, z. B. Li-S-Batterien für Fluganwendungen oder PbC-Batterien für industrielle Anwendungen.

Im Folgenden werden die einzelnen Batterietechnologien (mit Ausnahme der bereits auf den Seiten 30–79 und der Roadmap auf Seite 22/23 diskutierten Hochenergie-Batterien) mit ihrem Forschungsstand und Langfristperspektiven erläutert (vgl. Grafik auf Seite 86/87). Dabei erfolgt in der Grafik zudem eine Zuordnung A bis H für die Batterietechnologien, welche mit FuE-Herausforderungen [1] bis [25] bzw. Technologien und Ansätzen [26] bis [35] verbunden und in Steckbriefen (Seiten 92–111) näher erläutert sind.

Märkte unterschiedlicher (insbesondere für stationäre Anwendungen geeigneter) etablierter Energiespeichertechnologien⁴⁰ (Prognosen für 2020)



Polyanionische/LMFP-basierte Batterien

LIB mit polyanionischen Zellchemien umfassen viele unterschiedliche Materialien auf Phosphatbasis (LMFP) auf der Kathodenseite. Die Leistungsparameter sind meist vergleichbar oder schlechter als die von LIB mit konventionellen Schichtoxiden. Treiber für deren Entwicklung und Einsatz sind Co-freie Materialien mit Blick auf die Ressourcenverfügbarkeit und Rohstoffpreise. Auch sind teilweise verbesserte Sicherheitseigenschaften, die zu Einsparungen beim Batteriemanagementsystem (BMS) führen könnten oder höhere Energiedichte in großformatigen Zellen Vorteile der Technologie. LFP-basierte Zellen finden heute kommerzielle Verwendung, auch im automotive Bereich. Jedoch werden diese zunehmend von NMC-basierten LIB mit höheren Energiedichten verdrängt. LMFP könnten hier wieder zu einer Verbesserung der Energiedichte gegenüber LFP beitragen. Anwendungsbereiche bei nicht zu hoher Priorisierung der Energiedichte wären z. B. im industriellen Bereich wie der Logistik. Beispielsweise werden in Gabelstaplern aktuell bereits zunehmend LFP-basierte Batterien anstelle von Pb-Batterien eingesetzt. Generell gelten diese Batterien für Anwendungen, in welchen Sicherheit und Zyklenfestigkeit im Vordergrund stehen als geeignet. Herausforderungen liegen darin, die momentan noch hohen Produktionskosten zu reduzieren. Damit sich der (günstige) Ressourcenpreis in den Herstellungskosten durchschlägt, wäre eine Hochskalierung nötig.

Batterien mit Konversionsmaterialien

Konversionsmaterialien stellen einen Überbegriff für viele unterschiedliche Materialien mit sehr hohen spezifischen Kapazitäten dar, häufig jedoch mit einem ungeeigneten Potenzial für die Verwendung als Anode/Kathode in lithiumbasierten Batterien. Theoretisch sind Materialkombinationen mit hoher Energiedichte denkbar. Aktuelle Forschungsthemen betreffen das Materialdesign und die Nanoskalierung der Materialien. Herausforderungen stellen die Volumenänderungen der Partikel dar, welche zu einer niedrigen Lebensdauer und Zyklenfestigkeit führen. Produktionstechnisch sind noch keine Verfahren etabliert und weitere Komponenten erfordern eine Anpassung (Elektrolyt, Zelldesign).

Natrium-Ionen-Batterien

Natrium liegt mit 2,6 Prozent in der Erdkruste vor und Na_2CO_3 kostet weniger als ein Zehntel des Li_2CO_3 (Carbonate)-Preises. Somit würden Natrium-Ionen-Batterien (Na-IB) eine kostengünstige Alternative zu LIB darstellen. Die Patentlandschaft ist weniger dicht besetzt und es könnten daher bessere Möglichkeiten zum Einstieg in die Produktion der Materialien und Batterien vorliegen. Für Na-IBs gibt es weiterhin ähnliche Wirtsmaterialien wie für LIBs (Schichtoxide, Phosphate). Lediglich aufgrund der Ionengröße von Natrium kann Graphit nicht verwendet werden und es muss z. B. auf Hard Carbons als Anodenmaterial zurückgegriffen werden. Hard Carbons besitzen mit 250–300 mAh/g allerdings eine niedrigere gravimetrische Kapazität. Die Materialwahl für die Anode stellt daher eine Herausforderung dar. Durch die aus der Ionengröße resultierende niedrigere intrinsische Dichte natriumbasierter Verbindungen ergibt sich insgesamt eine niedrigere Energiedichte im Vergleich zu LIB. Ansonsten wird im Vergleich zu LIB eine parallele Entwicklung gesehen, welche allerdings zeitlich verzögert erfolgt und jeweils mit Abschlägen bei den Leistungsparametern von 20 bis 30 Prozent verbunden ist. Auch der FuE-Aufwand ist durch die Übertragbarkeit der Fertigungslösungen von LIB (drop-in) vergleichsweise gering.

Metall-Schwefel (Me-S)-Batterien

Elementarer Schwefel zeigt eine gute elektrochemische Aktivität mit verschiedenen Metallen (Me) und ist in der Lage zwei Elektronen pro Schwefelatom aufzunehmen. Aufgrund seiner guten Ressourcenverfügbarkeit und der niedrigen Gewinnungskosten gilt das Element als hochinteressant für zukünftige Speichieranwendungen. Theoretisch besitzen entsprechende Materialien als Kathode eine Kapazität von 1672 mAh/g bei vollständiger Umwandlung entsprechend $\text{S}^0 \rightarrow \text{S}^{2-}(\text{Me}_x)^{2+}$. Schwefel und Me-Polysulfide besitzen jedoch eine schlechte elektronische Leitfähigkeit, sodass für praktische Anwendungen die Funktionalisierung von Schwefel in Kohlenstoff- oder anderen Leitfähigkeitsstrukturen nötig ist.

Das Reduktionspotenzial gegenüber Li-, Na- und Mg-Metall-Anoden beträgt 2,1 V gegen Li/Li⁺, etwa 1,4 V gegen Na/Na⁺ und 1,6 V bzw. 0,8 V gegen Mg/Mg²⁺, woraus sich materialeitig theoretisch gravimetrische Energiedichten von über 2000 Wh/kg für Li-S und über 1000 Wh/kg für Na-S und Mg-S ergeben. Die Kernschwäche entsprechender Systeme besteht in der guten Löslichkeit von Metall-Polysulfiden in vielen organischen Lösungsmitteln, welche als Basis für Elektrolyte dienen. Dadurch kommt es im Verlauf der Zyklisierung zu einer Zersetzung der Kathode. Der Transport der gelösten Ionen zur Anode führt zur Selbstentladung der Zellen (Shuttle Effekt).

Me-Luft/O₂-Batterien

Metall-Luft/Sauerstoff-Batterien sind Gegenstand der Grundlagenforschung und der Eindruck, dass eine schnelle Kommerzialisierung nicht möglich sein wird, hat sich mittlerweile gefestigt. Verschiedene Schritte der Redoxreaktion sind noch zu schlecht verstanden, um auftretende Degradationserscheinungen zu verhindern. Bislang ist unklar, ob Me-Luft-Systeme zu konkurrenzfähigen Preisen hergestellt werden können, da die zu verwendenden Materialien noch nicht feststehen und der Einsatz vielfältiger Additive nötig sein dürfte. Herausforderungen liegen auf allen Ebenen, vom Material- bis zum Systemdesign vor.

Redox-Flow-Batterien

Pilotanlagen und Kleinserien für Redox-Flow-Batterien (RFB) sind schon seit einiger Zeit vorhanden. Die vergleichsweise geringen Energiedichten und Gesamtkonzepte lassen nur Anwendungen im stationären Bereich zu (z. B. Spitzenlastpuffer).⁴¹ Maßgeblich für die weitere Entwicklung und die Verbreitung von RFB ist die Wirtschaftlichkeit, welche sich durch die Kosten für die gespeicherte Energie über die Lebens- bzw. Anwendungsdauer (LCOE) ergibt. Die Betrachtung lediglich einzelner Leistungsparameter wie die Energiedichte, Investitionen ist daher nicht relevant. Mittel- bis langfristig müssten 5–10 ct/kWh erreicht werden. Herausforderungen bestehen hinsichtlich der Steigerung der Lebensdauer und Senkung der Herstellungskosten.

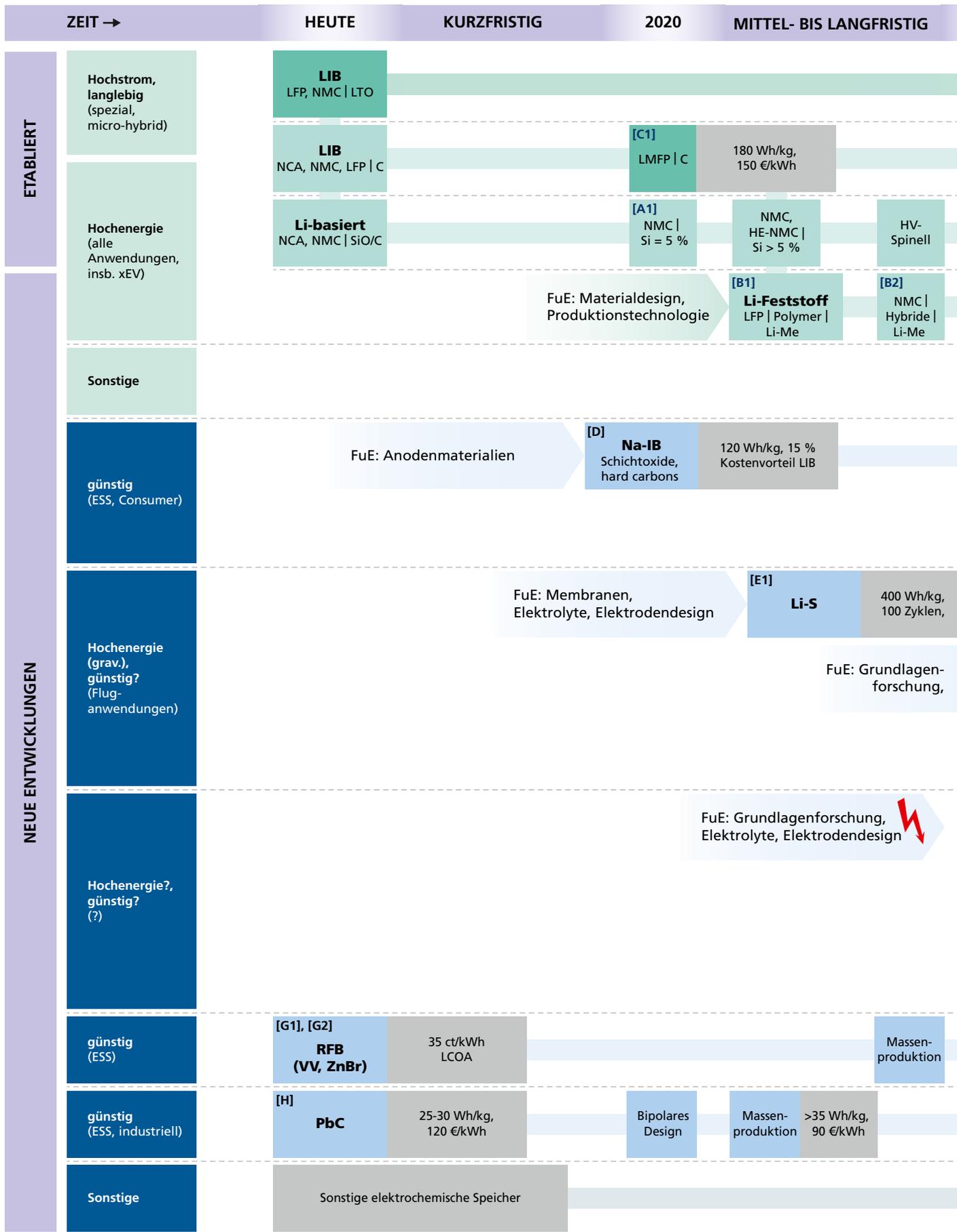
Blei-Carbon-Batterien (PbC)

PbC-Batterien stellen eine Weiterentwicklung der bestens etablierten Blei-Säure-Batterien dar. Daher sind keine disruptiven Veränderungen hinsichtlich des Preises und der Energiedichte zu erwarten. Der Vorteil von PbC-Batterien begründet sich durch die deutlich erhöhte Nutzungsbandbreite von Pb-Akkumulatoren durch die Erhöhung der Leistungsdichte und dadurch, dass damit eine Nutzung und Lagerung vorzugsweise im teilgeladenen Zustand ermöglicht wird, was insbesondere für Pufferanwendungen (z. B. Solar- oder Hausspeicher) unerlässlich ist. Gegenüber LIBs ist auch langfristig ein Preisvorteil zu erwarten. Es liegt eine sehr gute Kompatibilität zu bisherigen auf Blei-Säure-basierenden Anwendungen vor (drop-in). Herausforderungen bestehen beim Design der negativen Elektrode und bei der Fertigungstechnik.

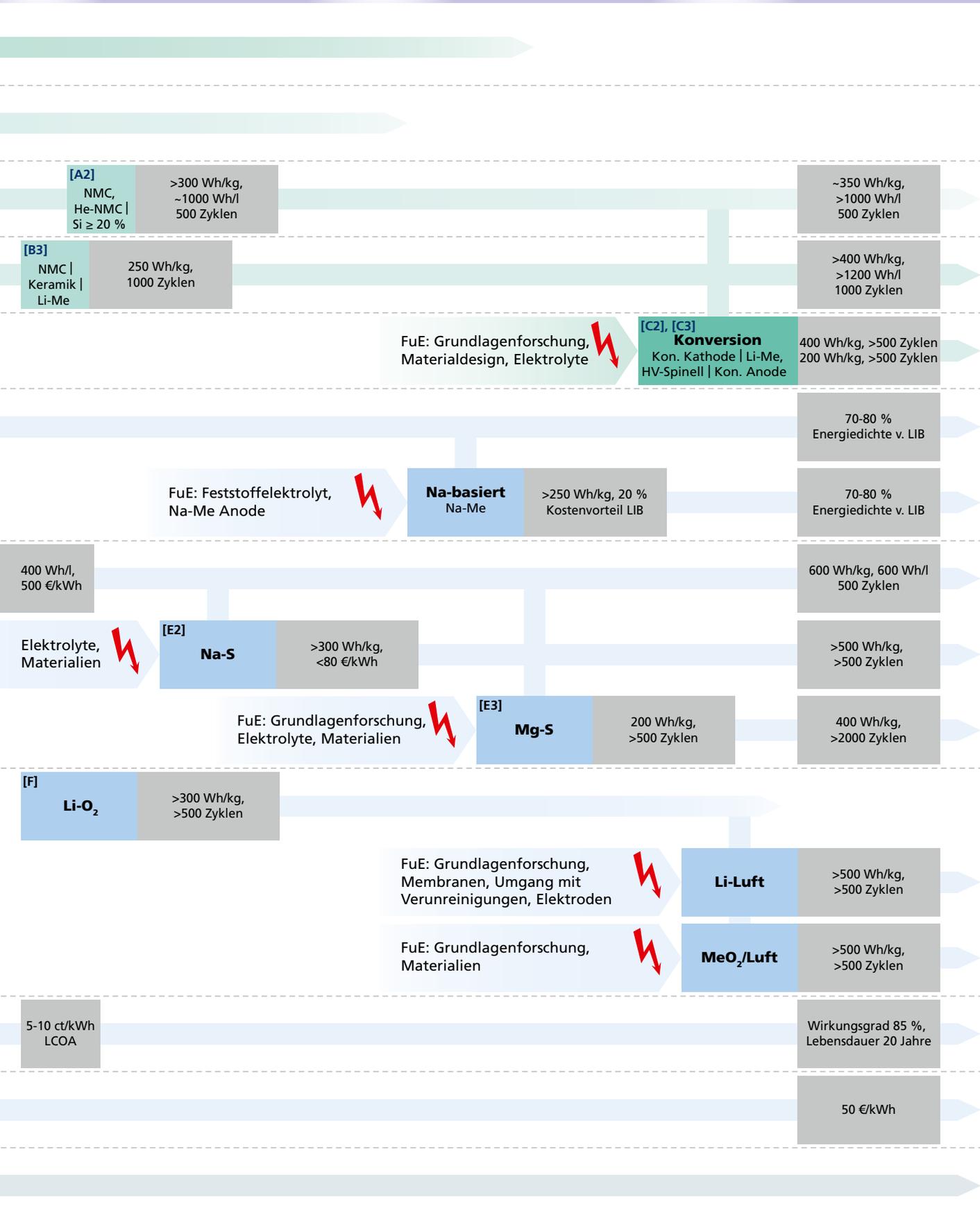
Sonstige elektrochemische Speicher

Organische Batterien auf Basis organischer Kathodenmaterialien wären ein Beispiel für weitere hier nicht weiter vertiefte elektrochemische Energiespeicher. Für ihre Realisierung sind keine Übergangsmetalle nötig und es werden ganz andere Syntheseverfahren benötigt. Potenziell wären solchen Batterien extrem günstig. Herausfordernd ist jedoch, dass keine geeigneten Elektrolyte zur Verfügung stehen und die Zyklenfestigkeit nicht gegeben ist.

Insgesamt ist festzustellen, dass bei der Entwicklung künftiger Batterietechnologien häufig fehlende geeignete Elektrolyte die Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien begrenzen. Die Herausforderungen sind vielfältig und betreffen z. B. die chemische/elektrochemische Stabilität, Korrosivität und Lösungseigenschaften.



2030 LANGFRISTIG 2040 PERSPEKTIVISCH 2050 VISION



FuE-HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE ENTWICKLUNG ZUKÜNFTIGER BATTERIEN

Kompositindikator (zukünftige Batterietechnologien)

Für die Herausforderungen zukünftiger Batterietechnologien wird das gleiche Vorgehen bei der Bildung des Kompositindikators gewählt wie im Fall der Kompositindikatoren zu Hochenergie-Batterien (vom Material bis zur Zelle sowie System).

Da die insgesamt 35 Ansätze zur Verbesserung von lithiumbasierten und nicht lithiumbasierten Materialien, Verfahren, Komponenten bis zu neuen Batterietechnologien (andere Zellchemien, neue Konzepte) jenseits konventioneller LIBs auf unterschiedlichen Ebenen vorliegen, ist ein direkter Vergleich hinsichtlich eines technologischen und wirtschaftlichen Nutzens dieser Ansätze zunächst nicht möglich (insbesondere zwischen den Ansätzen [1] bis [25] sowie [26] bis [35]). Um einen Vergleich auch mit Hochenergie-Batterieentwicklungen vornehmen zu können, müssen zuerst Kompositindikatoren (I) auf Zellebene gebildet werden, welche eine komplette Zelle, bestehend aus Kathode, Anode und Elektrolyt beschreiben. Dies erfolgt mit der Formel

$$I_{Zelle}^{VN/NA} = (I_{Kathode}^{VN/NA} + I_{Anode}^{VN/NA} + I_{Elektrolyt}^{VN/NA})/3$$

wobei VN = Vorteil/Nutzen und NA = Nachteil/Aufwand bedeutet. Dabei erfolgt eine neue Zuordnung A bis H, welche es erlaubt die FuE-Herausforderungen sowie Technologien und Ansätze [1] bis [35] insgesamt auf Batterietechnologieebene mit definierter Zellchemie auszudrücken.

Da genaue Materialien und Designs für neue Technologien in der Regel noch nicht bekannt sind, schließen Indikatoren für z. B. Li-S-Systeme eventuelle Herausforderung bei der Formulierung geeigneter Elektrolyte bereits mit ein.

Vergleich zukünftiger Batterietechnologien

Um bei dem Vergleich die Tatsache zu berücksichtigen, dass manche Batterietechnologien bzw. Entwicklungen für die fordernde Anwendung in Elektroautos geeignet sind und andere nicht, sind entsprechende Hochenergie-Batterietechnologien farblich markiert.

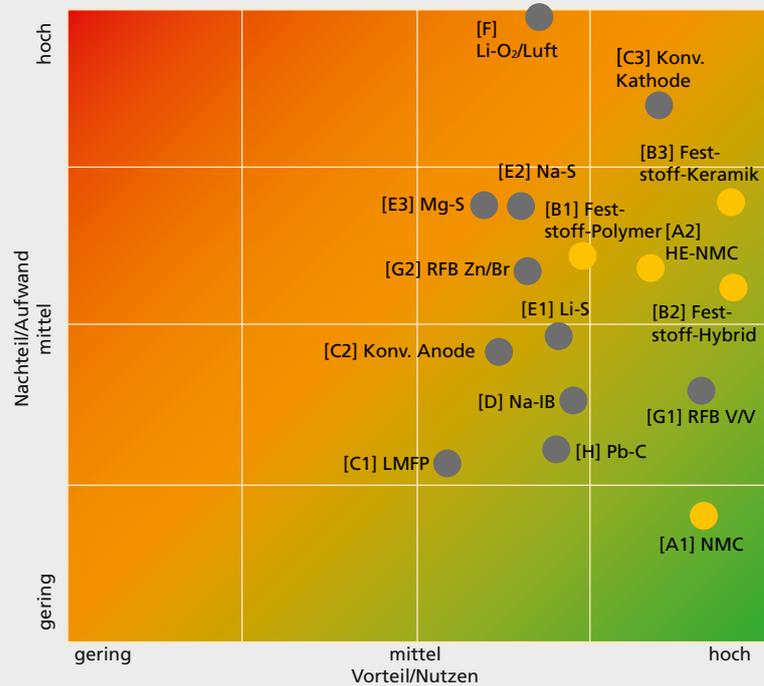
Der Vergleich der zukünftigen Batterietechnologien untereinander [A] bis [H] zeigt, dass mit optimierten Lithium-Ionen-Batterien auf Basis nickelreicher Kathodenmaterialien der größte Nutzen bei geringstem Aufwand verbunden ist. Bei zukünftigen Hochenergie-NMC-Batterien kombiniert mit Hochkapazitätsanoden mit Si/C-Kompositen und höheren Si-Anteilen steigt entsprechend der FuE-Aufwand deutlich an. Mit den Entwicklungen wird ein ähnlicher Aufwand wie bei polymeren, hybriden bis keramischen Feststoffsystemen verbunden. Allerdings wird der Nutzen durch hybride und keramische Feststoffbatterien auch mit Blick auf die Anwendung in Elektrofahrzeugen am höchsten eingestuft.

PbC (für industrielle Anwendungen), Na-Ionen-Batterien (z. B. in ESS, 3C-Anwendungen), V/V RFB (für ESS-Anwendungen), LMFP (für Spezialanwendungen) werden mit mittlerem bis hohem Nutzen eingestuft und bringen jeweils Vorteile in den für sie geeigneten Anwendungen. Der Entwicklungsaufwand ist bei diesen Technologien nicht mehr allzu hoch. Bei Zn/Br RFB-Systemen gibt es allerdings im Gegensatz zu V/V keine Industrieakteure in Europa und es liegen grundlegendere Herausforderungen als bei V/V RFB vor.

Bei Me-S-Batterien steigen die Herausforderungen (z. B. für Raumtemperatur-Na-S, Mg-S-Systeme gegenüber Li-S). Sobald Lösungskonzepte für Li-S zur Verfügung stehen wird erwartet, dass Na-S und Mg-S ebenfalls von den Erkenntnissen profitieren können und somit der Li-S-Entwicklung folgen. Li-O₂/Luft und Systeme mit Konversionskathoden stecken noch in der Grundlagenforschung. Trotz des hohen potenziellen Nutzens liegen diese Systeme noch in weiter Ferne für eine anwendungsspezifische Nutzbarmachung.

Kompositindikatoren für zukünftige Batterietechnologien

Vergleich zukünftiger Batterietechnologien



[A1] NMC	[A1] Zelle basierend auf NMC 811 und Si/C mit Si = 5 % (siehe [1], [7.1], [9.2])
[A2] HE-NMC	[A2] Zelle basierend auf HE-NMC und Si/C mit 5 % < Si < 20 % (siehe [2], [7.1], [7.2], [9.2])
[B1] Feststoff-Polymer	[B1] Feststoffbatterie mit Polymerelektrolyt, Li-Me-Anode und LMFP-Kathode (siehe [26], [8], [11])
[B2] Feststoff-Hybrid	[B2] Feststoffbatterie mit Hybridelektrolyt, Li-Me-Anode und NMC-Kathode (siehe [1], [8], [12])
[B3] Feststoff-Keramik	[B3] Feststoffbatterie mit Keramikelektrolyt, Li-Me-Anode und NMC-Kathode (siehe [1], [8], [13])
[C1] LMFP	[C1] LIB mit LMFP-Kathode, C-Anode und konventionellem Elektrolyt (siehe [6], [26])
[C2] Konv. Anode	[C2] Zelle basierend auf HV-Spinell und Metalloxid-Konversionsanode (siehe [3], [10.1], [27])
[C3] Konv. Kathode	[C3] Zelle basierend auf FeF ₃ -Konversionskathode, Li-Me-Anode und keramischem Feststoffelektrolyt (siehe [28], [8], [13])
[D] Na-IB	[D] Na-IB mit oxidischer Kathode und Hard-Carbon-Anode (siehe [29])
[E1] Li-S	[E1] Li-S-Batterie (siehe [30])
[E2] Na-S	[E2] Na-S-Batterie (siehe [31])
[E3] Mg-S	[E3] Mg-S-Batterie (siehe [32])
[F] Li-O ₂ /Luft	[F] Li-O ₂ /Luft-Akkumulator (siehe [33])
[G1] RFB V/V	[G1] Redox-Flow-Batterie basierend auf Vanadium/Vanadium (siehe [34.1])
[G2] RFB Zn/Br	[G2] Redox-Flow-Batterie basierend auf Zink/Brom (siehe [34.2])
[H] Pb-C	[H] Blei-Carbon-Akkumulator (siehe [35])

STECKBRIEFE PERSPEKTIVEN ZUKÜNFTIGER BATTERIETECHNOLOGIEN

Alternative Batterietechnologien

Die 10 zukünftigen, alternativen Batterietechnologien bzw. -entwicklungen [26] bis [35] sind in den folgenden Steckbriefen vertieft charakterisiert. Dabei werden folgende Aspekte adressiert und im Text erläutert:

- Ziele und Vision
(adressierter Mehrwert für die Zelle und das System),
- Vorteile/Nachteile
(intrinsische Perspektive),
- Bottleneck (Red Brick Wall)/Lösungsansatz
(technische Perspektive),
- FuE-Aufwand/Produzierbarkeit
(Prozess-, Produktionsperspektive),
- Reifegrad/Marktnähe
(kommerzielle Perspektive),
- Anwendungen
(Eignung für Anwendungen).

Technologie-Roadmaps (explorativ)

Weiterhin sind die Bottlenecks (sogenannte Red Brick Walls, technische Hürden) und entsprechende Ansätze zur Lösung der Bottlenecks in explorativen Roadmaps verortet, welche Teilauszüge der „Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien“ auf Seite 86/87 darstellt. Mit dem Lösen des Bottlenecks werden die jeweiligen definierten Ziele erreicht. Diese erfordern im Fall der zukünftigen Batterietechnologien in der Regel disruptive Lösungen und sind daher ganz klar perspektivisch zu verstehen. Sollten aber disruptive Lösungen realisiert werden, so könnten diese ggf. auf weitere Ansätze und Technologien übertragen werden.

Bewertung

In einem Spinnendiagramm werden auf einer Skala 1 bis 3

- Vorteile (gering, mittel, hoch),
- Nachteile (hoch, mittel, gering),
- Reifegrad (gering = Grundlagenforschung und entspricht TRL 1–3, mittel = angewandte Forschung und entspricht TRL 4–5, hoch = Pilot, Prototyp bzw. marktreif und entspricht TRL 6–7 bzw. TRL 8–9)⁴²,
- FuE-Aufwand (hoch, mittel, gering),
- Produzierbarkeit (Umstellung, Anpassung, drop-in),
- Marktbedeutung (gering, mittel, hoch)⁴³

bewertet. Dabei sind die „semi-quantitativen“ Bewertungen so aufgetragen, dass ein größerer Wert jeweils als positiver einzustufen ist. Die Bewertung ist stets zwischen 1 und 3 normiert.

NUMMERIERUNG UND ZUORDNUNG DER STECKBRIEFE

Neue Materialien

[26]	Polyanionische Kathoden-Materialien	92
[27]	Konversionsanoden	94
[28]	Konversionskathoden	96

Neue Batteriechemien

[29]	Natrium-Ionen-Batterien	98
[30]	Lithium-Schwefel-Batterien	100
[31]	Natrium-Schwefel-Batterien	102
[32]	Magnesium-Schwefel-Batterien	104
[33]	Metall-Sauerstoff/Luft-Akkumulatoren	106
[34]	Redox-Flow-Batterien (V/V [34.1], Zn/Br [34.2])	108
[35]	Blei-Carbon-Akkumulatoren	110

Die Zuordnung A bis H erlaubt es die FuE-Herausforderungen bzw. Technologien [1] bis [35], welche teils auf Komponentenebene und teils auf Ebene einer Batterietechnologie definiert sind, insgesamt auf Batterietechnologieebene mit definierter Zellchemie auszudrücken (vgl. Seite 89).

NEUE MATERIALIEN

[26] POLYANIONISCHE KATHODEN-MATERIALIEN (FOKUS: $\text{Li}(\text{Mn,Fe})\text{PO}_4$)

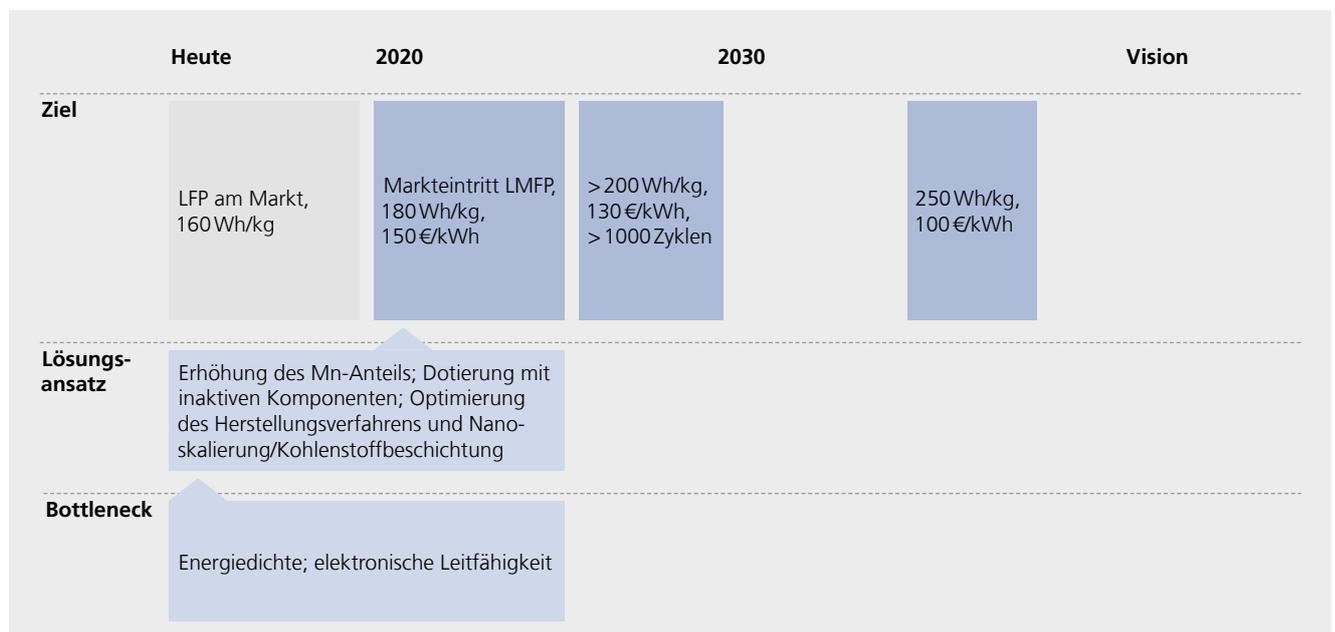
Polyanionische Kathodenmaterialien⁴⁴ sind – ähnlich der in LIBs typischerweise verwendeten Schichtoxide – Li-Übergangsmetallverbindungen, welche durch XO_y -Gruppen mit $\text{X} = \text{P, Si, S, As, Mo}$ oder W koordiniert sind. Die Vorzüge dieser Interkalationsmaterialien gegenüber den Schichtoxiden bestehen in einer oftmals höheren thermischen und strukturellen Stabilität der Verbindungen sowie aus der Möglichkeit durch den als induktiver Effekt beschriebenen Einfluss der polyanionischen Gruppen auf die Übergangsmetallionen teilweise höhere Redoxpotenziale und damit Zellspannungen erzielen zu können.

Der bekannteste Vertreter dieser Materialgruppe ist LiFePO_4 (LFP) mit einem Potenzial von 3,4V gegen Li/Li^+ , welches bereits seit einigen Jahren kommerziell Anwendung findet. Die im Vergleich zu Co-haltigen Materialien geringere erreichbare Zellspannung führt jedoch zu einer eher mäßigen Energiedichte. Das Redoxpotenzial kann durch Substitution von Fe mit Mn (4,1V) oder Co (4,8V) angehoben werden.

Übergangsmetallsilikate Li_2MSiO_4 ($M = \text{Mn, Fe, Co, Ni}$) bieten theoretisch die Möglichkeit der elektrochemischen Nutzbarmachung von zwei Li-Ionen pro Übergangsmetallion und damit hohe Kapazitäten von über 300mAh/g. Der praktische Einsatz der Materialien als Kathoden in LIBs ist jedoch durch deren schlechte elektronische Leitfähigkeit, strukturelle Instabilität während der Zyklierung und die mit gegenwärtig zur Verfügung stehenden Elektrolyten inkompatible Zellspannung verhindert.

Technologie und Ziel

LFP wird in LIBs bereits für verschiedene Anwendungen (xEV, high-power) eingesetzt und kann als ausgereift betrachtet werden. Der Einsatz von Mn-dotierten Materialien (LMFP) soll eine Alternative zu Co-haltigen Schichtoxiden darstellen, da aufgrund der gegenüber LFP höheren Zellspannung von LMFP akzeptable Energiedichten erreicht werden können. Die Reife derartiger Materialien wird mit TRL8 eingeschätzt. Die Technologie ist für Europa von Bedeutung, da sowohl Materialhersteller ansässig sind als auch verschiedene Zellprototypen auf Basis dieses Kathodenmaterials entwickelt werden. Hauptproduktion und Anwendung findet jedoch in China statt (Busse, ESS, z. B. durch BYD).



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Günstiges/gut verfügbares Kathodenmaterial mit hoher Stabilität	Co-frei, hohe Stabilität/Sicherheit	Günstiger, massentauglicher Herstellungsprozess, Performance	Materialdesign, Herstellungsprozess	Prototyp/Bemusterung (TRL 6–7)	xEV, Spezial (Sicherheit, Zyklusfestigkeit), industrieller Transport
	Niedrige Energiedichte und Leitfähigkeit	Optimierung des Mn-Anteils, Dotierung mit inaktiven Komp., Nanoskalierung, C-Coating	Gut, Handling von Nanopartikeln schwierig	kurzfristig	

Bottlenecks und Lösungsansätze

Die elektronische und ionische Leitfähigkeit von LMFP-Partikeln sinkt mit steigendem Mn-Anteil, wodurch sich die Leistungsdichte entsprechender Zellen reduziert. FuE-Herausforderungen bestehen in der gleichzeitigen Optimierung der Zellspannung (möglichst hoher Mn-Anteil) und Leitfähigkeit (möglichst niedriger Mn-Anteil). Durch Dotierung mit elektrochemisch inaktiven Komponenten, Nanoskalierung und Kohlenstoffbeschichtung der Partikel können einige der kinetischen Hemmnisse abgebaut werden. Der FuE-**Aufwand** wird als mittelmäßig hoch eingeschätzt.

Vorteile und Nachteile

Hauptvorteil gegenüber Schichtoxiden ist die gute Verfügbarkeit und der geringe Preis von Fe und Mn gegenüber Co. Gravimetrisch ist der Metallanteil im Preis von LFP etwa halb so hoch im Vergleich zu NMC 111. Die Nachteile ergeben sich aus der niedrigen Energiedichte und dem durch die Nanoskalierung bedingten komplexeren Herstellungsprozess.

Produzierbarkeit

Produktionsmethoden für LMFP-Materialien sind bekannt. Für die Elektroden- und Zellfertigung besteht eine hohe Kompatibilität zu konventionellen Materialien. Hinsichtlich möglicher Zellformate bestehen keine Einschränkungen. Aufgrund der guten thermischen Stabilität eignen sich die Materialien insbesondere für großformatige Zellen.

Anwendungen

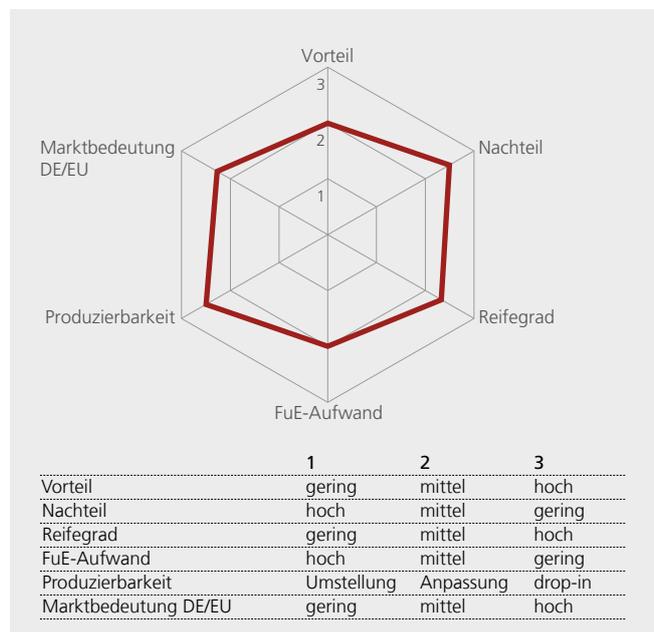
Die Anwendungen von LMFP sind vielfältig. Das Material kommt insbesondere dann als Alternative zu NMC in Frage, wenn Zyklusstabilität oder die Zellsicherheit im Vordergrund stehen. Momentan findet ein Einsatz im Bereich xEV (BEV, Busse, industrieller Transport) oder für langzeitstabile Batterien in Kombination mit LTO statt. Durch die Beimischung von LMFP zu anderen Kathodenmaterialien (NMC) kann eine höhere Zellsicherheit gegen thermisches Durchgehen (Vorteile gegenüber NMC+LMO Blends) ermöglicht werden.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Es wird erwartet, dass es in den kommenden Jahren zu einer zunehmenden Substitution von LFP durch LMFP kommen wird. Aus Sicht der Energiedichte ist das Ziel die Nutzung eines möglichst hohen Mn-Anteils.

Gegenwärtig besitzt LFP/LMFP noch einen mit anderen (Co-haltigen) Materialien vergleichbaren Preis/kWh. Durch Verbesserungen im Produktionsprozess und weitere Hochskalierung wird jedoch bis 2020 eine deutliche Reduktion der Produktionskosten erwartet, welche die Wettbewerbsfähigkeit des Materials steigert.

Zukünftig sind Anwendungen besonders in preiskritischen Bereichen denkbar, in denen höchste Energiedichte nicht entscheidend ist. Der Einsatz des Materials wird wesentlich an die Entwicklung des Co- bzw. Ni-Preises gekoppelt sein.



NEUE MATERIALIEN

[27] KONVERSIONSANODEN MO_x ⁴⁵

Eine weitere Alternative zu Interkalationsanoden stellen Konversionsmaterialien dar. Zumeist werden dafür Übergangsmetalloxide MO_x ($M = Fe, Ni, Mn, Co, Cr$) genutzt, welche mit Lithium eine Konversionsreaktion in ihre reduzierte metallische Form bzw. zu Lithiumoxid eingehen. Durch die vollständige Umwandlung können dabei Kapazitäten bis 1000 mAh/g erreicht werden. Im Verlauf der Konversionsreaktion kommt es dabei zur Ausbildung einer Matrix von metallischen Nanopartikeln und Li_2O . Die Volumenausdehnung bei vollständiger Lithierung liegt im Bereich von 70–100 %.

Technologie und Ziel

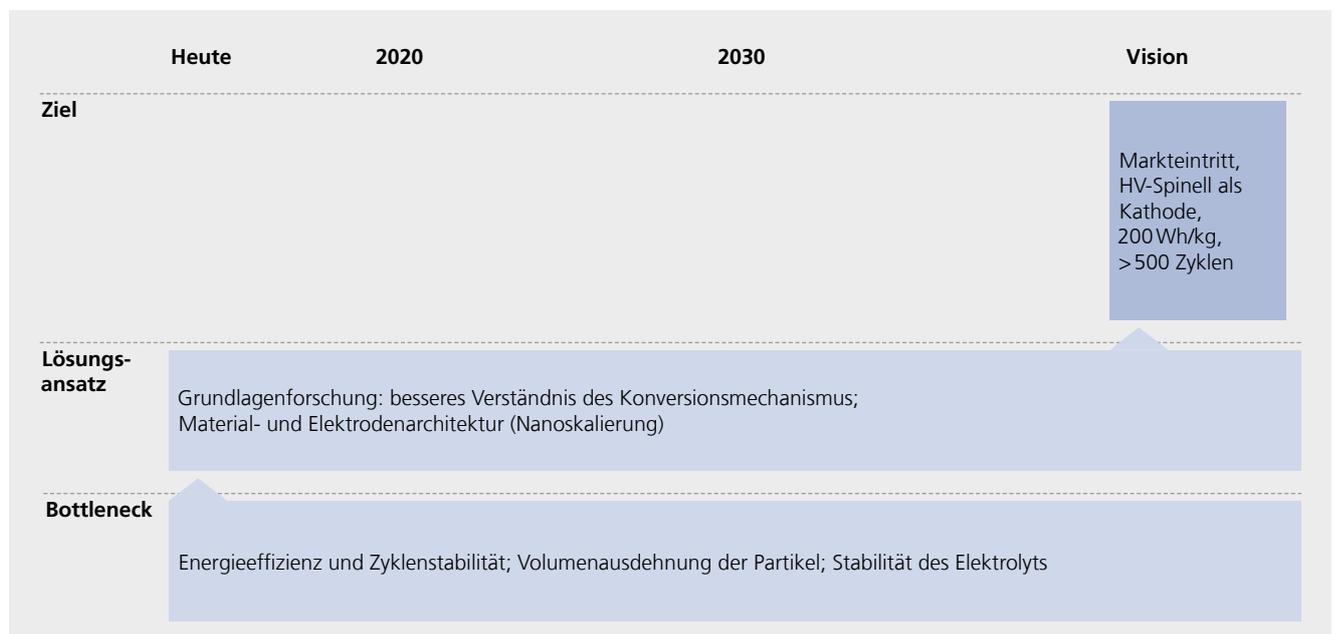
Konversionsmaterialien sind derzeit noch weit von einer Kommerzialisierung entfernt. Die Technologien befinden sich im Bereich der angewandten Forschung (TRL 4–5). Im Labormaßstab existieren Versuchszellen mit nanostrukturierten Materialien, welche eine gute Stabilität über mehrere 100 Zyklen zeigen. Unter den Übergangsmetalloxiden sind besonders Mn- und Fe-Oxide attrak-

tive Kandidaten für den Einsatz in Batterien, da eine gute Ressourcenverfügbarkeit besteht. Beide Materialklassen besitzen jedoch ein hohes Reduktionspotenzial gegenüber Li/Li^+ (Fe-Oxide $\sim 0,8V$, Mn-Oxide $\sim 0,5V$) und eine hohe Potenzialdifferenz zwischen Oxidation und Reduktion (0,9V bzw. 0,7V Hysterese). Um dennoch nutzbare Zellspannungen zu erreichen, ist eine Kombination mit Hochvoltkathoden (Spinell oder Polyanionische) notwendig.

Im Bereich der Grundlagenforschung werden deutsche Forschungsaktivitäten und Resultate als international wettbewerbsfähig angesehen.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Die größte Schwäche oxidischer Übergangsmetalle als Konversionsanoden besteht in der hohen Differenz zwischen den Lade- und Entladepotenzialen, welche zu einer sehr schlechten Energieeffizienz derartiger Zellen führen. Das hohe Redoxpotenzial gegenüber Li/Li^+ übersetzt sich auf Vollzellebene in eine niedrige Zellspannung, welche den Energiegewinn der hohen spezifischen Anodenkapazität teilweise kompensiert. Ähnlich wie im Fall der



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Material mit hoher volumetrischer Kapazität und guter Leistungsdichte	Energie/Leistungs-dichte	Energieeffizienz, Zyklenstabilität/ Volumenausdehnung, Elektrolytzersetzung	Grundlagen-forschung,	Grundlagenforschung (TRL 1–3)	Spezialanwendung (hohe Leistungs-dichte)
	Effizienz, Stabilität	Material- und Elektrodenarchitektur, besseres mechanistisches Verständnis	Nicht bekannt	Langfristig (30+ Jahre)	

Legierungsanoden leiden Konversionselektroden an Degradationserscheinungen aufgrund der starken Volumenänderungen. Die Morphologieveränderungen der Partikel, welche sich bei der Umwandlung zwischen Übergangsmetalloxiden und metallischen Nanopartikeln vollziehen, verhindern zudem den Aufbau einer stabilen SEI. An der Oberfläche der metallischen Partikel, welche im geladenen Zustand vorliegen, kann es zur katalytischen Zersetzung des Elektrolyten kommen.

Um die Speichereffizienz der Materialien zu verbessern bzw. ggf. die Spannungshysterese zwischen Lithiierung und Delithiierung zu verringern, sind Anstrengungen im Bereich der Grundlagenforschung notwendig, insbesondere, um ein besseres Verständnis der Konversionsmechanismen zu erlangen. Der **FuE-Aufwand** wird als hoch angesehen. Die Zyklierbarkeit der Materialien kann durch Optimierung der Material- und Elektrodenarchitektur erreicht werden. Ansätze bestehen, ähnlich zu den Legierungsmaterialien, in der Nutzung komplexer MO_x/C -Komposite oder MO_x -Nanopartikel.

Vorteile und Nachteile

Der Hauptvorteil der Konversionsanoden besteht in ihrer hohen volumetrischen Energiedichte, welche deutlich höher als Graphit ist. Darüber hinaus können auch höhere Leistungsdichten, wie z. B. eine deutlich schnellere Ladung/Entladung im Bereich 10–20°C erreicht werden. Die praktisch erreichbare gravimetrische Energiedichte von Vollzellen ist jedoch aufgrund des Gewichts der Übergangsmetalloxide und des hohen Anodenpotenzials vergleichbar oder schlechter als die von Graphit. Weitere Nachteile ergeben sich aus der niedrigen Energieeffizienz und bislang erreichten Zyklenstabilität.

Produzierbarkeit

Da es sich im Fall der hier diskutierten Materialien um Oxide handelt, wird von einem einfachen Verarbeitungsvorgang ohne Einschränkungen hinsichtlich Feuchtigkeit oder Atmosphäre ausgegangen. Insbesondere beim Batterierecycling und der Ressourcenrückgewinnung bieten Oxide ein hohes Potenzial.

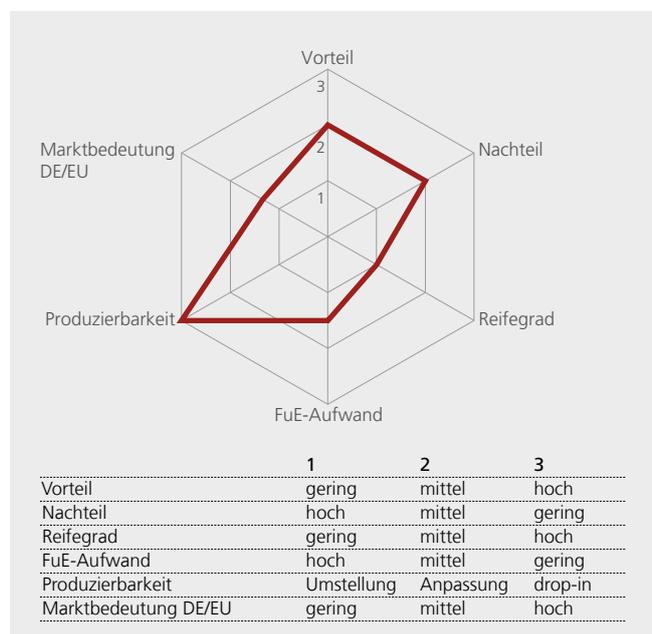
Zur großskaligen Darstellung komplexer Nanomaterialien müssen jedoch erst entsprechende Herstellungsverfahren entwickelt werden. Eine Eignung der Materialien wird insbesondere für zylindrische und prismatische Zellen gesehen.

Anwendungen

Einsatzmöglichkeiten könnten im Bereich von Spezialanwendungen und Hochleistungsbatterien entstehen. Ein Einsatz im Mobilitätsbereich ist aufgrund der mäßigen gravimetrischen Energiedichte von Vollzellen aktuell eher unwahrscheinlich.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Der Einsatz von Konversionselektroden in Sekundärbatterien wird derzeit als noch ungewiss eingestuft. Eine Nutzbarmachung kann nur stattfinden, falls es gelingt entscheidende Materialparameter wie die Potenzialhysterese zu verändern. Ob dies prinzipiell überhaupt möglich ist, ist jedoch nicht klar. Als hypothetisches Ziel kann daher eine Markteinführung 2050 als Zelle in Kombination mit einer Hochvoltkathode angenommen werden, welche hinreichende Stabilität über mindestens 500 Zyklen zeigt.



NEUE MATERIALIEN

[28] KONVERSIONSKATHODEN M_aX_b (FOKUS FeF_3)

Konversationskathoden M_aX_b (z. B. $M = Fe, X = F$) besitzen einen ähnlichen Lithierungsmechanismus wie Konversionsanoden. Aufgrund ihres deutlich höheren Redoxpotenzials gegen Li/Li^+ ist für die Kathodenseite insbesondere die Klasse der Übergangsmetallfluoride interessant. FeF_3 bietet bei vollständiger Umsetzung zu metallischem Fe und LiF eine theoretische spezifische Kapazität von 712 mAh/g. Die Reduktion findet bei einer Spannung von 3,3 bzw. 2,1 V gegen Li/Li^+ statt (zwei Redoxplateaus). Wie auch im Fall der Konversionsanoden sind die Oxidations- und Reduktionsreaktionen des Eisenfluorids durch eine deutliche Hysterese von etwa 1 V getrennt.

Technologie und Ziel

Die Technologieentwicklung von FeF_3 -Kathoden befindet sich momentan auf dem Stand der Grundlagenforschung (TRL 1–3), wobei von einem im Vergleich zu Konversionsanoden niedrigeren Entwicklungsstand ausgegangen werden kann. Im Labormaßstab werden für Nanokomposite reversible Kapazitäten im Bereich zwischen 250 und 400 mAh/g über 50 bis wenige 100 Zyklen hinweg erreicht. Im Bereich der Grundlagenforschung besitzt Deutschland eine international starke Position.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Analog zu den Schwächen der Konversionsanoden leiden Konversionskathoden an einer durch die Spannungshysterese bedingten niedrigen Energieeffizienz und einer bislang niedrigen Zyklenstabilität und praktischen Energiedichte. Die Leitfähigkeit, insbesondere der Fluoride, ist vergleichsweise gering. Für eine Optimierung der Materialien ist zunächst ein besseres Grundlagenverständnis notwendig. Die Zyklenfestigkeit und Leitfähigkeit kann durch eine Anpassung der Elektroden- und Materialstruktur verbessert werden. Der FuE-Aufwand wird als hoch eingeschätzt.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Material mit hoher Kapazität	Hohe Energiedichte	Energieeffizienz, Zyklusstabilität, prakt. Energiedichte, Elektrolytzersetzung	Grundlagenforschung	Grundlagenforschung TRL (1–3)	Spezialanwendungen (hohe Energiedichte)
	Geringe Effizienz, geringe Leitfähigkeit, Zyklusstabilität	Besseres mechanisches Verständnis, Elektroden-/Materialarchitektur	Massendarstellung von Fluoriden nicht geklärt	Langfristig (30+ Jahre)	

Vorteile und Nachteile

Vorteile werden aufgrund der hohen volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte (FeF_3) gesehen, welche theoretisch die Werte von Interkalationskathoden deutlich übersteigt.⁴⁶ Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der guten Ressourcenverfügbarkeit von Fe. In fluoridierter Form ist das Material jedoch toxisch. Nachteilig auf die Leistungsparameter wirken sich weiter die geringere Energieeffizienz, Zyklusstabilität und bislang praktisch erreichte Kapazität aus.

Produzierbarkeit

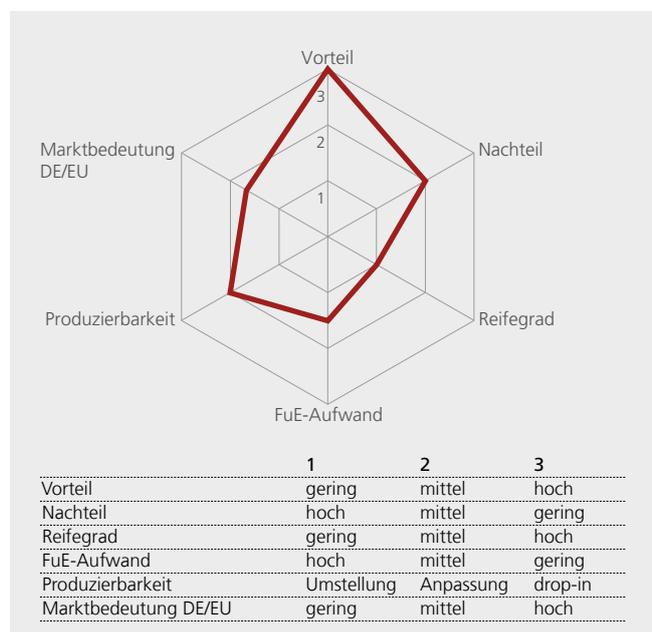
Die Möglichkeit zur großskaligen Produzierbarkeit von fluorbasierten Materialien zu wettbewerbsfähigen Kosten ist bisher ungeklärt. Eine potenzielle Eignung der Materialien wird insbesondere für zylindrische und prismatische Zellen gesehen.

Anwendungen

Bislang ist aufgrund der momentanen Leistungsparameter unklar, ob Konversionskathoden für Hochenergiezellen in Elektrofahrzeugen zur Anwendung kommen können. Gegebenenfalls ist ein Einsatz in Spezialanwendungen denkbar.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Die kommerzielle Nutzbarkeit der Materialien ist ungewiss. Als Vision werden die Materialien als Kathode in Zellen mit hoher gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte gesehen. In Kombination mit einer Li-Metall-Anode sind theoretisch Werte von 400 Wh/kg bzw. 800 Wh/l auf Zellebene bei mindestens 500 Zyklen denkbar.



NEUE BATTERIECHEMIEN

[29] NATRIUM-IONEN-BATTERIEN

Natrium-Ionen-Batterien (Na-IBs) besitzen dasselbe Funktionsprinzip wie LIBs und sind aus Interkalations- bzw. Insertionselektroden aufgebaut. Aufgrund seiner gegenüber Lithium hohen Ressourcenverfügbarkeit (wenige Prozent der Erdkruste) und eines damit verbundenen niedrigen Preises von Natrium könnten Na-IBs zukünftig in großskaligen, preisgünstigen Speicheranwendungen Einsatz finden.

Technologie und Ziel

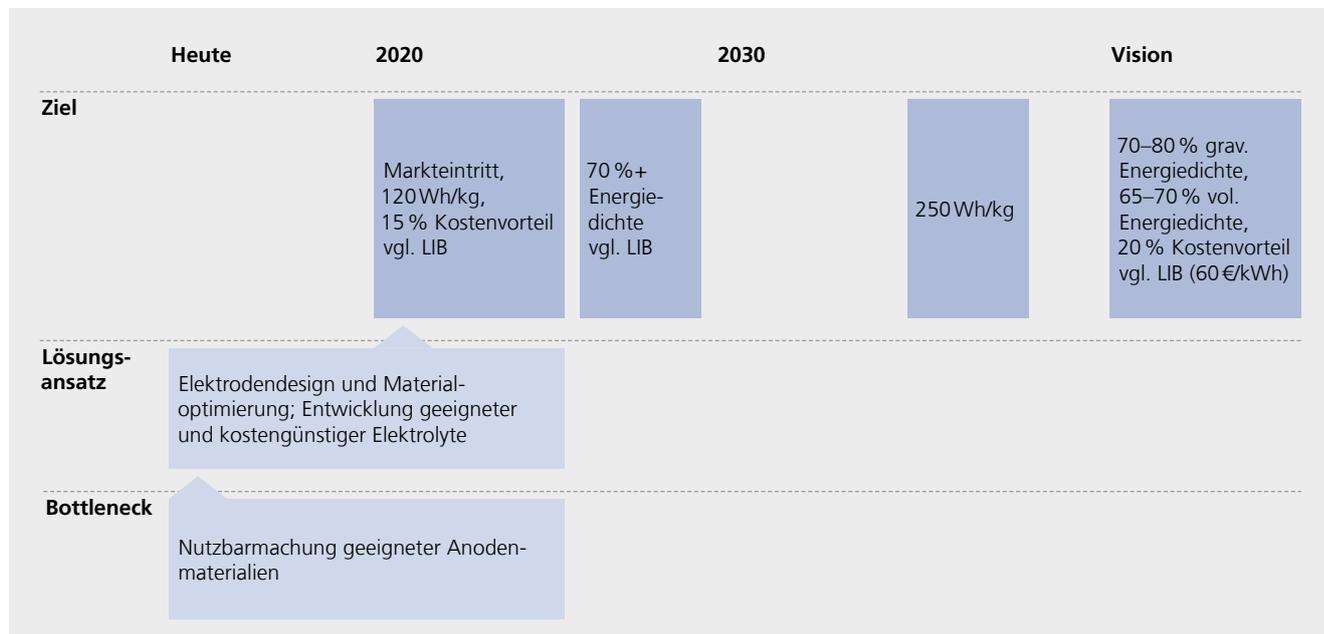
Aktuell befindet sich die Na-IB-Technologie im Prototypenstadium bzw. im Bereich der Pilotproduktion (TRL 6–7). Eine kleinskalige Zellfertigung ist bereits durch wenige Firmen implementiert, sodass die Marktreife der Technologie als relativ weit fortgeschritten angesehen werden kann.⁴⁷ Aktuell liegen die Leistungsparameter der Zellen etwa in der Größenordnung von 50 % der Parameter von LIBs (100–120 Wh/kg). Eine zeitnahe Verbesserung auf etwa 70 % der LIB-Parameter wird als wahrscheinlich angesehen. Das Ziel der Entwicklung ist es, eine kostengünstige und ressourcen-

verträgliche Energiespeicherung zu ermöglichen, die im Vergleich zu LIBs ein breiteres und evtl. großskaligeres Anwendungsspektrum zulässt. Aus Sicht der Li-Verfügbarkeit könnten Na-IBs zudem zu einer Entlastung führen.

Die Bedeutung von Na-IB für Deutschland und die EU wird als sehr hoch eingeschätzt. Das Technologiefeld ist im Vergleich zu LIBs wesentlich weniger stark durch Patente belegt, sodass eine Entwicklung in Europa mit anschließender Material- und Zellproduktion möglich wäre. Die Wettbewerbsfähigkeit von Deutschland und Europa wird als sehr hoch eingeschätzt. Aufgrund des hohen Entwicklungsbedarfs der Technologie könnte Europa seine Position durch konsequente Forschungsaktivitäten weiter ausbauen.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Aufgrund des höheren Ionenradius von Natrium gegenüber Lithium besitzen entsprechende Interkalationskathodenmaterialien eine geringere intrinsische Dichte, was sich in eine niedrigere spezifische Kapazität übersetzt. Auch anodenseitig bieten typische kohlenstoffbasierte Materialien aufgrund der schwachen



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Günstige/verfügbare und expansive Technologie	Ressourcen- verfügbarkeit, Kosten	Niedrige Energie- dichte Anode, hohes Elektrolytvolumen	Material und Elektrolyt	Prototyp (TRL 6–7)	ESS, low cost consumer
	Energiedichte niedriger	Materialdesign, Ersatz LiPF ₆ -basierte Elektrolyte	Drop-in-Technologie	kurzfristig	

Na-C-Wechselwirkung eine gegenüber Lithium deutlich niedrigere Kapazität für Natrium-Ionen. Graphit lässt unter Standardbedingungen keine nennenswerte Na-Interkalation zu, weshalb zumeist Hartkohlenstoffe verwendet werden. Die geringe Dichte dieser Materialien schlägt sich jedoch in einer niedrigen volumetrischen Energiedichte nieder. Zum anderen erfordern die hohe Porosität und die Notwendigkeit von dickeren Elektrodenschichten höhere Elektrolytvolumina.

Lösungsansätze werden insbesondere in der Material- und Designoptimierung der Anode gesehen. Für die Entwicklung kommerzialisierbarer Zellen ist zudem die Identifizierung weiterer Elektrolyte notwendig (z. B. PF₆-Alternativen), welche kostengünstiger und sicherer als vorhandene Systeme sind. Der **Aufwand** wird insgesamt als mittelmäßig hoch eingeschätzt bzw. als im Vergleich zu anderen post-LIB-Technologien deutlich geringer.

Vorteile und Nachteile

Hauptvorteil der Technologie ist die gute Ressourcenverfügbarkeit der für die Zellchemie nötigen Elemente Na, Fe, Mn und C, welche sich zum einen in potenziell geringere Kosten übersetzt (15–20 % bezogen auf €/kWh) und zum anderen Einsatzmöglichkeiten jenseits bestehender LIB-Anwendungen schafft. Die gravimetrische Zellperformance ist aufgrund intrinsischer Eigenschaften auf 70 bis maximal 80 % des Levels von LIBs beschränkt. Die volumetrische Energiedichte kann Werte zwischen 65–70 %, gemessen an LIBs, erreichen.

Produzierbarkeit

Na-IB-Materialien lassen sich grundsätzlich analog zu LIB-Materialien produzieren und verarbeiten, weshalb die Prozessübertragbarkeit zwischen beiden Technologien als sehr hoch angesehen wird. Es besteht damit die Möglichkeit, bestehende LIB-Produktionsinfrastruktur für Na-IBs einzusetzen.

Anwendungen

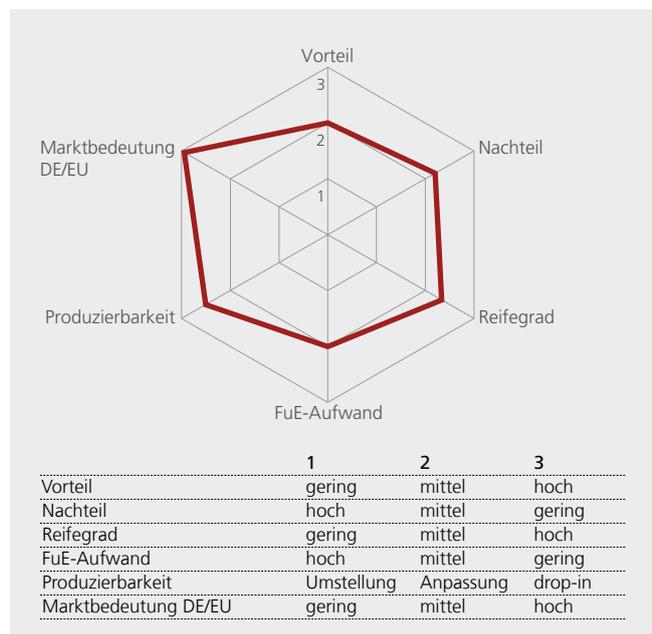
Anwendungsfelder werden aufgrund des geringen Preises und der vergleichsweise niedrigen Energiedichte vor allem im Bereich ESS sowie im low-cost-Consumerbereich gesehen. Eine Anwendung in Elektrofahrzeugen wird als sehr unwahrscheinlich ein-

geschätzt. Durch die Etablierung von Na-IBs könnte damit eine Marktsegmentierung in teurere, jedoch leistungsfähigere LIBs für Elektromobilitätsanwendungen sowie Na-IBs für kostengünstige Consumer-Elektronik entstehen.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Aufgrund der hohen Reife natriumbasierter Batterien erscheint ein Markteintritt mit einer Energiedichte von 120 Wh/kg auf Zellebene 2020 möglich. Bis 2035 wird von einer Erhöhung der Energiedichte auf 250 Wh/kg ausgegangen.

Eine ausentwickelte Na-IB-Technologie lässt gegenüber LIBs Kosteneinsparungen erwarten. Bis 2050 sind damit Preise von 60 €/kWh möglich. Die Preisschere zu lithiumbasierten Systemen kann sich bei Verknappung von Lithium auch auf über 20 % öffnen. Die langfristige Entwicklung der Leistungsparameter wird analog zum Verlauf für LIBs gesehen und eine Konvergenz auf größer 70 % der entsprechenden Werte von LIBs angenommen.



NEUE BATTERIECHEMIEN

[30] LITHIUM-SCHWEFEL-BATTERIEN

Technologie und Ziel

Li-S-Batterien besitzen unter den Me-S-Systemen den höchsten Entwicklungsgrad. Als Prototyp und in Kleinserien werden bereits Batterien getestet und eingesetzt. Eine flächendeckende Kommerzialisierung hat bislang nicht stattgefunden, sodass die Technologieentwicklung insgesamt noch im Bereich der angewandten Forschung (TRL 6–7) verortet wird. Im Labormaßstab existieren Prototypen mit einer hohen Zyklrierbarkeit von mehreren 1000 Zyklen. Aktuelle Zellen aus der vorkommerziellen Produktion erreichen bei einer Energiedichte von 350 Wh/kg jedoch nur etwa 100 Zyklen. Um die hohe spezifische Kapazität der S-Kathode ausnutzen zu können, wird anodenseitig metallisches Lithium verwendet. Es gibt jedoch auch Konzepte zur Nutzung von Si/C-Anoden, welche die erreichbaren Zyklenzahlen erhöhen könnten.

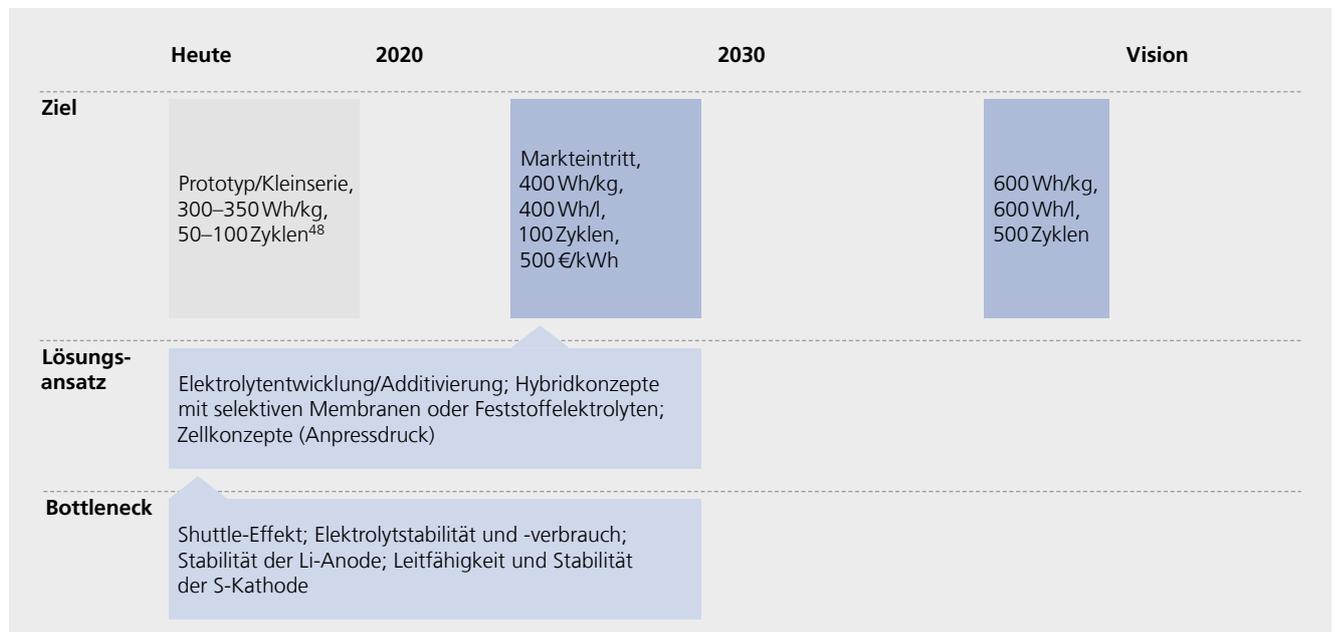
Die Bedeutung der Technologie für Deutschland und Europa wird als hoch eingeschätzt, da europäische Absatzmärkte für Li-S-Batterien vorhanden sind. Die Wettbewerbsfähigkeit Europas

wird aufgrund einer starken Forschung und der bereits bestehenden vorkommerziellen Produktion durch die englische Firma Oxis als gut angesehen.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Hauptschwäche bisheriger Flüssigelektrolytsysteme stellt die Löslichkeit von Li-Polysulfiden dar. Auf Anodenseite bestehen typische Probleme von Li-Metall-Anoden, wie die inhomogene Abscheidung von Lithium während der Zellladung, welche zu Dendritenbildung führt. Durch diese Strukturveränderung kann es zur Vergrößerung und Porosierung der Anode kommen, sodass ein wachsendes Elektrolytvolumen eingenommen wird, welches im Rest der Zelle nicht mehr zur Verfügung steht.

Aktuelle Lösungskonzepte setzen an der Elektrolytformulierung und der Verwendung von Elektrolytadditiven an. Neue Elektrolytklassen wie fluoridierte Ether zeigen eine geringere Polysulfidlöslichkeit. Daneben werden hybride Konzepte mit selektiven Membranen oder passivierenden Beschichtungen, welche einen Transport der Polysulfide zur Anode verhindern sollen, getestet. Auch eine trockene Anbindung der Li-Anode über Feststoff-



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Technologie mit hoher gravimetrischer Energiedichte	Gravimetrische Energiedichte	Elektrolytstabilität und Verbrauch, Li-Metall	Materialforschung, Modulkonzepte	Prototyp (TRL 6–7)	Fluganwendung, Einsatz in hybriden Traktionsspeichern
	Volumetrische Energiedichte, Leistungsdichte, Zyklenfestigkeit	Stabile Elektrolyte, Hybridkonzepte, Zellkonzepte mit Anpressdruck	Technologiebasis vorhanden, Optimierungsbedarf	Kurz- bis mittelfristig	

elektrolyte ist denkbar. Abseits der Materialforschung kann die Dendritenbildung der Li-Anode durch Druck auf die Elektrode/Zelle verringert werden. Ein hoher Anpressdruck auf das Li-Metall führt zu einer homogeneren Abscheidung während der Zyklierung. Die Umsetzung derartiger Ansätze auf Modulebene ist bislang noch nicht gegeben.

Der FuE-Aufwand wird insgesamt als mittelmäßig hoch eingeschätzt. Bedarf besteht sowohl auf Ebene der Materialien als auch im Bereich der Zell- und Modulkonzepte. Momentane Aktivitäten betreffen die Optimierung der passiven Zellkomponenten, sodass ein höherer Aktivmaterialanteil möglich wird.

Vorteile und Nachteile

Der Hauptvorteil von Li-S-Batterien besteht in der potenziell hohen gravimetrischen Energiedichte, die in perfekten Systemen auf bis zu 600 Wh/kg abgeschätzt wird. Im Vergleich zu LIBs sind aufgrund der geringen Kosten von Schwefel, welche jedoch teilweise durch die höheren Kosten metallischen Lithiums gegenüber Graphiten ausgeglichen werden, auch deutlich geringere Preise für Energiespeicher denkbar.

Neben den besprochenen Hemmnissen, die bislang einer kommerziellen Nutzbarkeit im Wege stehen, ist die intrinsische volumetrische Energiedichte von Li-S-Systemen geringer als in LIBs. Momentan wird hier etwa 50 % des Leistungswerts von LIBs erreicht. Auch in vollständig entwickelten Zellen kann maximal das Niveau heutiger Li-Ionen-Batterien erreicht werden. Weiter ist die erreichbare Leistung geringer als in kommerzialisierten Lithium-Ionen-Zellen. Momentane Prototypen können bei Stromstärken von etwa C/2 betrieben werden.

Produzierbarkeit

Eine Entwicklung von adäquaten Produktionsmethoden ist sowohl für die Aktivmaterialien, den Elektrolyten als auch auf Zellebene notwendig. Im Fall der Li-Metall-Anode können ggf. Methoden aus der Fertigung von Primärbatterien übernommen werden, es besteht jedoch weiterer Optimierungsbedarf. Hinsichtlich möglicher Zellformate werden keine Einschränkungen

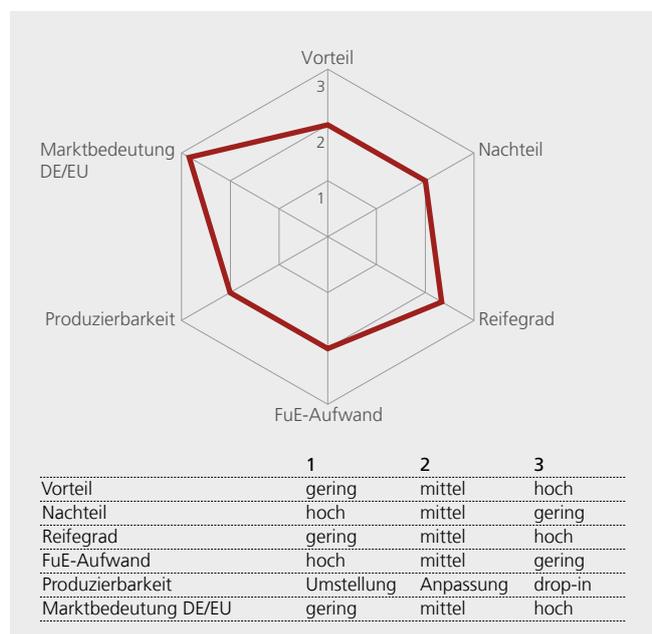
gesehen. Auf Modulebene fehlen bislang jedoch Konzepte, welche eine Druckaufbringung ermöglichen. Die Recyclingfähigkeit der metallischen Li-Anode wird als gut eingeschätzt.

Anwendungen

Prototypen werden bereits in Fluganwendungen eingesetzt, welche grundsätzlich einen interessanten Markt für Hochkapazitätssysteme darstellen. Automobilanwendungen sind vorstellbar, jedoch ist die geringe Leistungsdichte und volumetrische Energiedichte problematisch. Eventuell könnten hier unterschiedliche Batterietechnologien kombiniert werden.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Als Ziel der Technologieentwicklung wird insgesamt die Ermöglichung einer hohen gravimetrischen Energiedichte gesehen. Ein Markteintritt für 2020/25 ist wahrscheinlich. Bis 2050 werden insbesondere Steigerungen bei der Energiedichte als auch eine Erhöhung der Zyklenstabilität auf über 500 Zyklen erwartet. Die langfristige Vision besteht im Erreichen von 600 Wh/kg bzw. 600 Wh/l.



NEUE BATTERIECHEMIEN

[31] NATRIUM-SCHWEFEL-BATTERIEN

Technologie und Vision

Na-S-Batterien werden als Hochtemperaturvariante mit geschmolzenen Aktivmaterialien bereits seit längerem vereinzelt in stationären Anwendungen eingesetzt. Aus Sicherheitsgründen und für die Nutzbarmachung in mobilen Anwendungen ist die Entwicklung von Raumtemperatursystemen wünschenswert. Die RT-Technologie befindet sich momentan im Bereich der Grundlagenforschung (TRL 1–3), wird jedoch aufgrund der guten Ressourcenverfügbarkeit von Natrium als sehr interessant eingeschätzt. Es existieren noch keine vorkommerziellen Prototypen. Insgesamt könnte der Verlauf der Technologieentwicklung analog zu Li-S-Systemen erfolgen, jedoch mit deutlicher zeitlicher Verzögerung von etwa 10 Jahren.

Die Rolle Deutschlands und der EU wird als sehr wichtig eingeschätzt, Forschungsaktivitäten in diesem Bereich gelten als international wettbewerbsfähig.

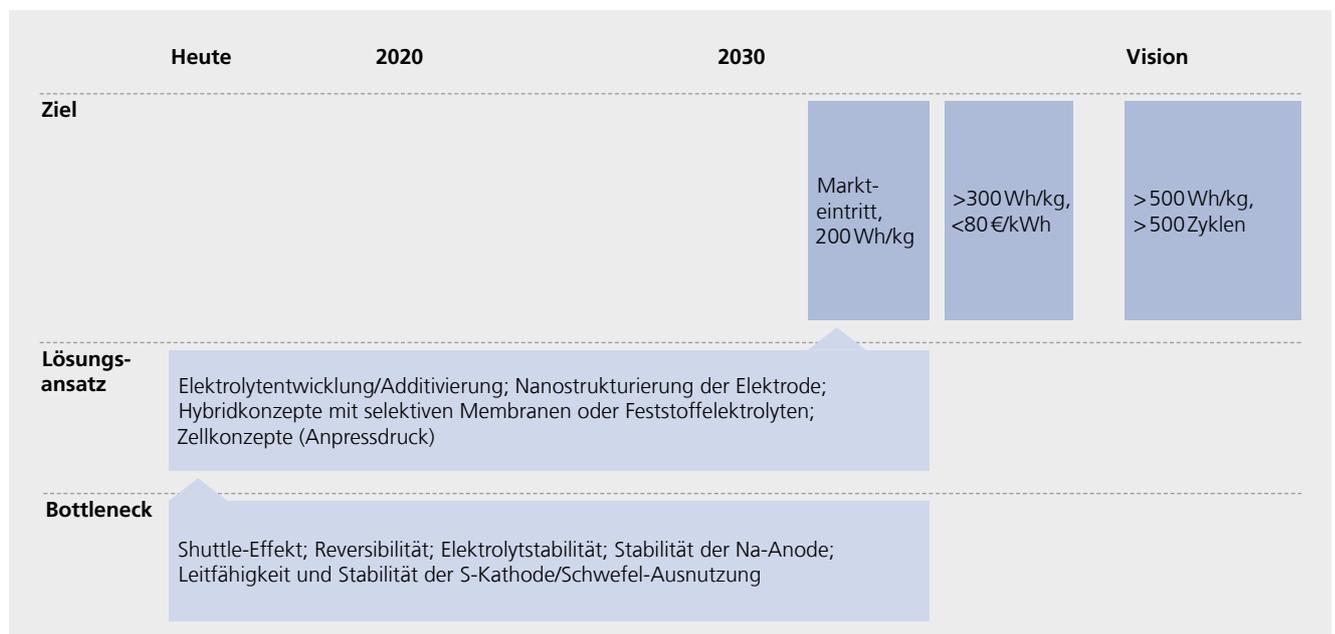
Bottlenecks und Lösungsansätze

Insgesamt bestehen ähnliche Schwierigkeiten wie bei Li-S-Systemen. Insbesondere die Reversibilität der elektrochemischen Reaktion ist jedoch schlechter als bei Li-S. Zudem wird der eingebrachte Schwefel nicht vollständig für die Umsetzung mit Natrium genutzt. Es wird erwartet, dass ähnliche Lösungskonzepte wie im Fall von Li-S entwickelt werden können, sobald diese für die Li-Technologie zur Verfügung stehen. Aufgrund der geringeren Festigkeit von metallischem Natrium gegenüber Lithium ist eine Unterdrückung der Dendritenbildung durch Druckaufbringung evtl. leichter möglich.

Der genaue **Aufwand** der Material- und Elektrolytentwicklung kann derzeit nicht abgeschätzt werden, wird jedoch als hoch angesehen.

Vorteile und Nachteile

Klare Vorteile gegenüber Li-S-Batterien ergeben sich aus der guten Rohstoffverfügbarkeit und dem niedrigeren Preis von Natrium. Aufgrund des niedrigen Schmelzpunktes von Natrium (98 °C) sind darüber hinaus Konzepte mit flüssiger Anode denk-



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Günstige, massentaugliche Technologie mit guter Energiedichte	Kosten, gravimetrische Energiedichte, Ressourcenverfügbarkeit	Schlechte Schwefel-Ausnutzung, niedrige Reversibilität, Elektrolyt, Na-Anode	Materialebene, Zellkonzepte	Grundlagenforschung (TRL 1–3)	ESS
	Volumetrische Energiedichte, Leistungsdichte, Zyklenfestigkeit	Elektrolytdesign, Nanostrukturierung, hybride Konzepte, Zellen mit Anpressdruck	Nicht bekannt, alternative Strategien notwendig	Mittelfristig	

bar, welche im Fall von Lithium nicht möglich wären (nur für stationäre Anwendungen). Als nachteilig erweisen sich die deutlich höhere Volumenänderung der Elektroden, aufgrund des größeren Durchmessers von Na-Ionen, sowie die durch die Zellspannung und das Gewicht der Na-Ionen bedingte niedrigere Energiedichte.

Produzierbarkeit

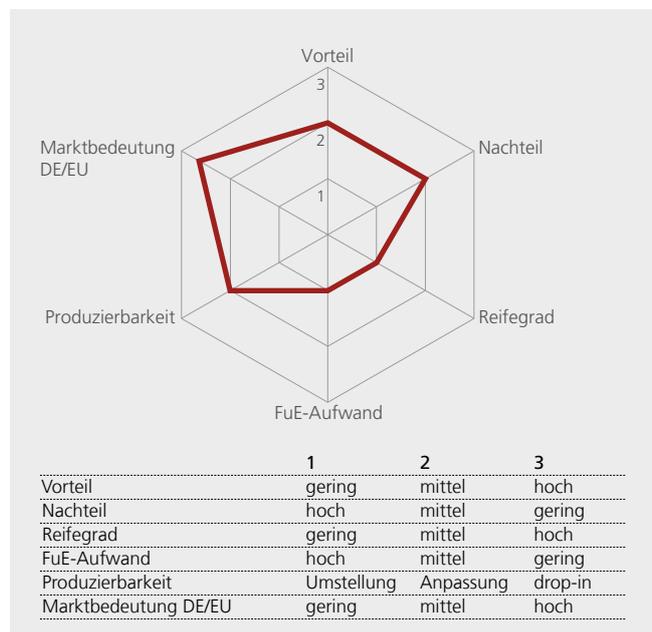
Es wird davon ausgegangen, dass Produktionsstrategien analog zu Li-S entwickelt werden können. Allerdings werden für natriumbasierte Batterien andere Elektrolyte benötigt, was ggf. ein anderes Handling erfordert. Hinsichtlich verwendbarer Zellformate werden keine Einschränkungen gesehen.

Anwendungen

Aufgrund der niedrigen antizipierten Kosten von Na-S-Batterien und ihrer vergleichsweise geringen volumetrischen Energiedichte werden Hauptanwendungen im Bereich stationärer Energiespeicher gesehen.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Als Ziel der Technologie gilt die Entwicklung sehr günstiger und großskalig verfügbarer Energiespeicher. Der Fokus liegt nicht auf den Leistungsparametern. Ein Markteintritt mit 200Wh/kg ist etwa 10 Jahre nach Li-S 2030/2035 denkbar. 2040 könnte eine Na-S-Technologie mit >300Wh/kg und einem Preis unter 80€/kWh zur Verfügung stehen. Die Grenzparameter liegen bei >500Wh/kg.



NEUE BATTERIECHEMIEN

[32] MAGNESIUM-SCHWEFEL-BATTERIEN

Technologie und Ziel

Die Nutzbarmachung von Mg-S-Systemen liegt gegenüber Li-S und Na-S noch deutlich weiter in der Zukunft. Momentan bewegen sich Forschungsaktivitäten im Bereich der Grundlagenforschung (TRL 1–3). Ähnlich zur Na-S-Technologie bestehen die Vorzüge von Mg-S-Batterien in der guten Rohstoffverfügbarkeit und potenziell geringen Kosten der Komponenten.

Die Bedeutung für Deutschland und Europa wird als hoch eingeschätzt. Die Wettbewerbsfähigkeit nationaler und europäischer Aktivitäten ist gut.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Die Schwierigkeiten und Lösungsansätze werden analog zu Li-S und Na-S gesehen. Über den Entwicklungsaufwand ist derzeit keine Abschätzung möglich. Es können komplexe Probleme auftreten, jedoch kann es auch eine Übertragbarkeit von Lösungen

der anderen Schwefelsysteme geben. Für den Einsatz von Mg-Ionen werden andere Elektrolyte als für Lithium und Natrium benötigt.

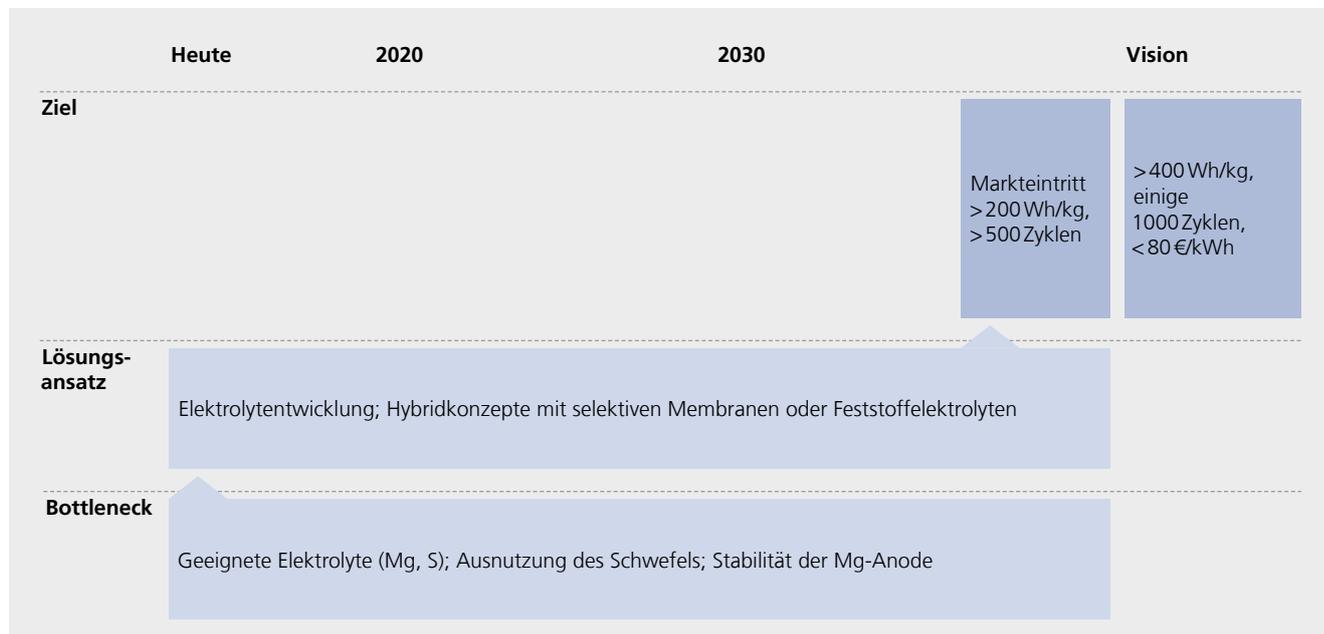
Diese liegen für Interkalationselektroden bereits vor, jedoch ist die Eignung für Schwefel-Kathoden unbekannt. Insgesamt wird der Entwicklungs-**Aufwand** als hoch eingeschätzt.

Vorteile und Nachteile

Gegenüber Li-S besteht der Hauptvorteil in der guten Verfügbarkeit von Magnesium, woraus sich je nach Elektrolyt Kostenvorteile ergeben können. Bei der Abscheidung von metallischem Magnesium besteht zudem eine deutlich geringere Tendenz zur Dendritenbildung. Nachteilig erweist sich die niedrige Zellspannung, welche sich in eine niedrigere Energiedichte übersetzt.

Produzierbarkeit

Aktuell können keine Aussagen zur Produzierbarkeit von Mg-S-Zellen gegeben werden. Für alle Komponenten sind alternative Produktionsstrategien nötig. Hinsichtlich möglicher Zellformate werden keine Einschränkungen gesehen.



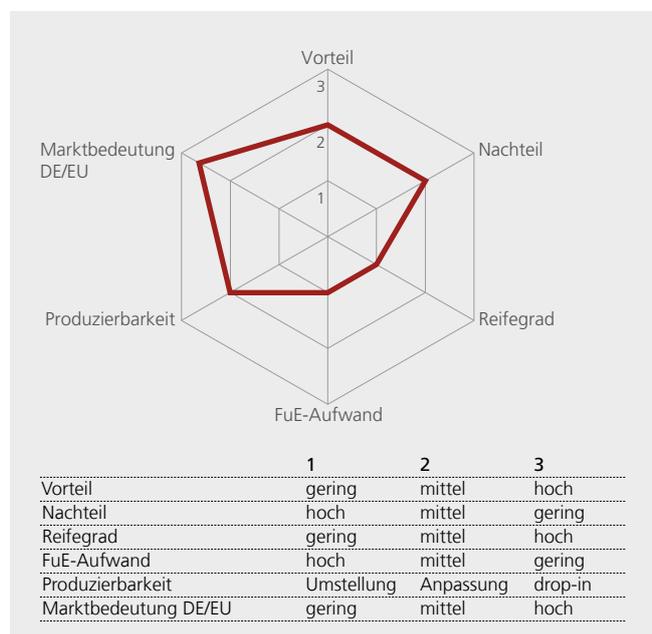
ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Technologie mit geringen Speicherkosten	Kostenvorteil hoch, sehr gute Ressourcenverfügbarkeit	Kosten Elektrolyt, Schwefel Ausnutzung	Materialebene, Zellkonzepte	Grundlagenforschung (TRL 1–3)	ESS
	Zellspannung, Energiedichte	Angepasste Elektrolyte, Nanostrukturierung, Hybridkonzepte	Nicht bekannt, alternative Strategien notwendig	Langfristig	

Anwendungen

Aufgrund der mäßigen volumetrischen Energiedichte und der potenziell niedrigen Herstellungskosten liegen erwartete Anwendungsfelder im Bereich stationärer Speichersysteme.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Das langfristige Ziel ist ähnlich zu Na-S die Darstellung kostengünstiger und großskalig verfügbarer Speichersysteme. Ein Markteintritt könnte 10 Jahre nach Na-S im Bereich 2040/45 bei 200Wh/kg erfolgen. Als langfristige Vision wird eine Zelle mit 400Wh/kg, 15–20 Jahren Lebensdauer und einer Stabilität von einigen 1000 Zyklen bei einem Preis <80 €/kWh gesehen.



NEUE BATTERIECHEMIEN

[33] METALL-SAUERSTOFF/LUFT- AKKUMULATOREN

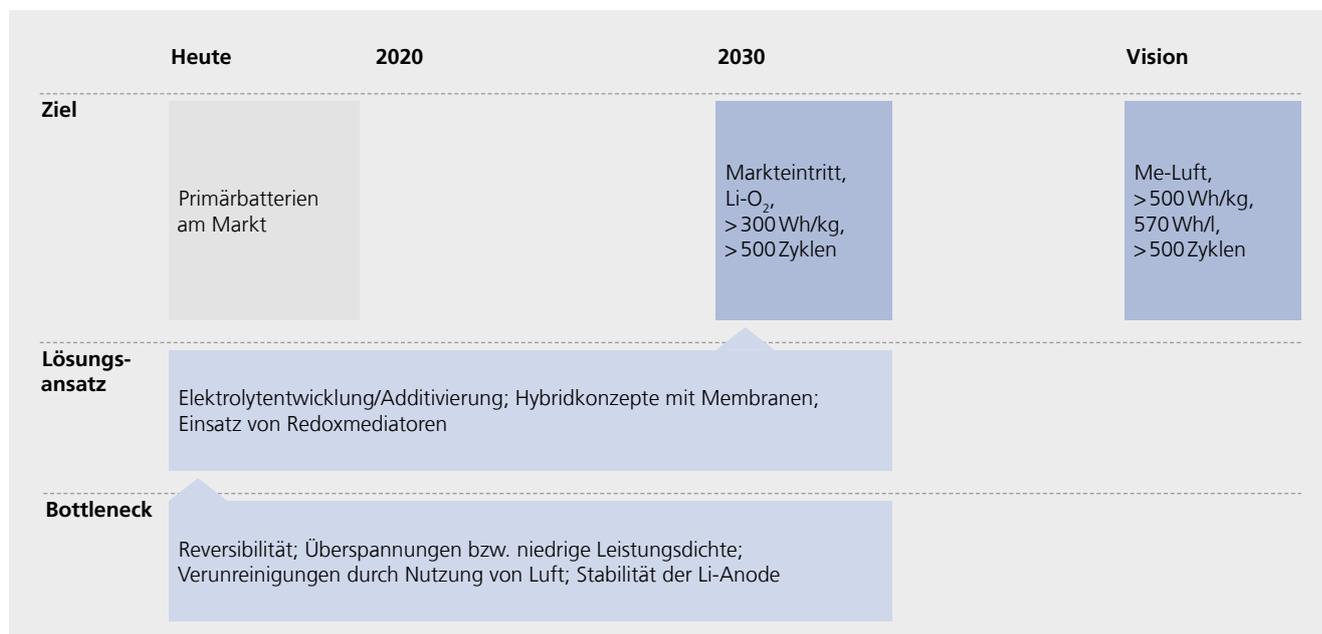
Metall-Sauerstoff (Me-O₂) oder Me-Luft-Batterien besitzen sehr hohe theoretische Energiedichten, da im Fall der Nutzung des in der Luft enthaltenen Sauerstoffs als Kathoden-„Material“ kein Leergewicht für Wirtsmaterialien nötig ist. Prinzipiell bestehen Konzepte zur Nutzung verschiedener Metalle wie Li, Na, Mg, Al oder Zn⁴⁹. Aufgrund der vergleichsweise hohen Zellspannung und des niedrigen Gewichts von Lithium stehen Li-Luft-Batterien im Fokus der Forschung. Materialeitig besitzt das Li-Luft-System eine theoretische Energiedichte von 3450 Wh/kg.

Technologie und Ziel

Me-Luft-Primärbatterien sind kommerziell verfügbar und werden für Spezialanwendungen mit besonderen Anforderungen an die Energiedichte eingesetzt. Der Entwicklungsstand von Sekundärbatterien wird auf TRL 1–3 eingeschätzt. Als Zellkomponenten kommen insbesondere metallisches Lithium als Anode, leitfähige und sauerstoffdurchlässige Kohlenstoffstrukturen als Unter-

stützung der Luft/Li₂O₂-Kathode und Membranen, welche sich zum einen sauerstoffdurchlässig und abweisend gegenüber Wasserdampf und anderen ungewünschten Gasen verhalten, zum anderen jedoch in der Lage sind, flüssige Elektrolyten einzuschließen, in Frage. Das Zusammenspiel von Membran und Kohlenstoff muss auf kleinen Längenskalen die Koexistenz von Elektrolyt, Sauerstoff und elektrischer Leitfähigkeit zulassen. Unter Einbeziehung dieser elektrochemisch passiven Komponenten reduziert sich die mögliche Energiedichte des Li-Luft-Systems auf etwa 1000 Wh/kg. Je nach Anforderung an die Leistungsdichte der Batterien besteht die Möglichkeit zum Betrieb im sogenannten „Atmungsmodus“ (Luftzufuhr bei Umgebungsdruck) oder mittels eines Kompressors. Momentan verfügbare Primärzellen erreichen Energiedichten von etwa 800 Wh/kg⁵⁰.

Ziel der Technologie ist die Entwicklung einer Batterie mit sehr hoher praktischer Energiedichte und potenziell niedrigem Preis durch den Verzicht auf teure Kathodenmaterialien. Die Bedeutung für Deutschland und Europa wird als sehr hoch eingeschätzt. Die internationale Wettbewerbsfähigkeit der FuE-Landschaft ist hoch.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Technologie mit hoher Energiedichte und niedrigen Kosten	Hohe Energiedichte, kein Kathodenaktivmaterial notwendig	Geringe Reversibilität, Stabilität Li-Anode, Verunreinigungen, Überspannungen	Grundlagenforschung, disruptive Lösungen für viele Komponenten notwendig	Grundlagenforschung (TRL 1–3)	ESS
	Niedrige Zellspannung, niedrige Leistungsdichte	Elektrolytentwicklung, Additive, hybride Konzepte (Membranen)	Nicht bekannt, alternative Strategien notwendig	Langfristig	

Bottlenecks und Lösungsansätze

Der FuE-Bedarf für die Nutzbarmachung von Li-Luft-Batterien ist sehr hoch. Gegenwärtig verfügen entsprechende Labormodelle über geringe Leistungsdichten. Die Kinetik der ablaufenden Reaktionen muss signifikant verbessert werden. Zwischen Lade- und Entladespannung besteht eine hohe Potenzialhysterese. Die zugrundeliegenden Überspannungen an den Elektroden verhindern die volle Nutzung der möglichen Zellspannung. Für den Betrieb mit Luft fehlen Konzepte zur Verhinderung des Eindringens von Verunreinigungen. Weiter sind Probleme der Elektrodenstabilität (Kohlenstoffzersetzung, Anodenreaktivität) noch nicht gelöst.

Momentane Trends zur Umgehung der Hindernisse werden im Bereich der Elektrolytadditive gesehen. Hybridkonzepte aus festen Membranen und flüssigem Elektrolyt können zum Schutz der Anode eingesetzt werden. Die Überspannungen an der Li_2O_2 -Kathode könnten durch die Zugabe von Redoxmediatoren reduziert werden.

Der **Aufwand** zur Weiterentwicklung der Technologie wird als hoch angesehen. Es wird davon ausgegangen, dass inkrementelle Verbesserungen bestehender Systeme nicht zur Überwindung der vorhandenen Probleme ausreichen. Disruptive Verbesserungen, etwa die Formulierung besonderer Elektrolyte, sind notwendig.

Vorteile und Nachteile

Hauptvorteil der Technologie gegenüber LIBs ist die hohe mögliche Energiedichte bei potenziell niedrigen Kosten. Aufgrund der beschriebenen Bottlenecks ergeben sich gegenwärtig große Nachteile im Bereich der Reversibilität (Zykluszahl, Effizienz).

Produzierbarkeit

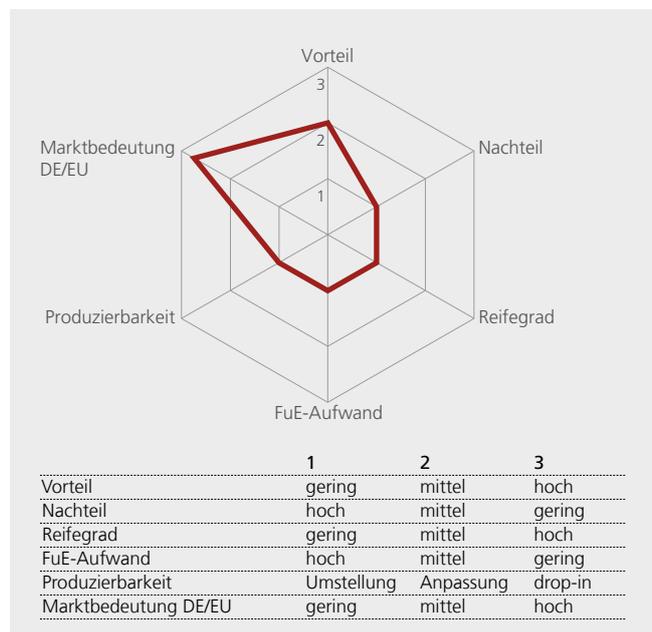
Für die Produktion von Li-Luft-Zellen sind alternative Strategien notwendig. Bislang existiert kein Zelldesign. Standardverfahren sind nicht anwendbar, da das System offen ist. Es werden Möglichkeiten gesehen, Konzepte aus der Fertigung von Primärzellen zu übertragen. Bestehende Standardzellformate, insbesondere zylindrische, kommen für Li-Luft-Zellen nicht in Frage.

Anwendungen

Langfristig werden Einsatzmöglichkeiten für HE-Li-Luft-Systeme im Bereich mobiler Anwendungen gesehen. Die langsame Kinetik der ablaufenden Reaktionen macht jedoch einen Einsatz in Fahrzeugen eher unwahrscheinlich. Es ist denkbar, dass zunächst der Einsatz als stationärer Speicher in Frage kommt, da sich hierbei zusätzliches Equipment wie BMS, Kompressoren oder Sauerstoffspeicher (Li-O_2) nicht negativ auswirken. Es bestehen jedoch Bedenken bezüglich der mangelnden Zyklusfestigkeit, welche ESS-Anwendungen entgegensteht. Denkbar sind neue Konzepte, welche mit extrem hoher Speicherkapazität und niedrigen Zykluszahlen, ähnlich zu Pumpspeichern, arbeiten.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Die Weiterentwicklung der Li-Luft/ O_2 -Technologie bedingt signifikante und disruptive Lösungen. Ein Markteintritt für Li-O_2 wird frühestens 2030 mit Leistungsparametern von $>300 \text{ Wh/kg}$ und >500 Zyklen gesehen. Später könnten andere Me-Luft/ O_2 -Systeme folgen. Es wird erwartet, dass diese in der Reihenfolge Li, Na, Mg am Markt auftauchen. Als Vision sind Leistungsparameter von $>500 \text{ Wh/kg}$, 570 Wh/l bei 500–1000 Zyklen denkbar.



NEUE BATTERIECHEMIEN

[34] REDOX-FLOW-BATTERIEN

Redox-Flow-Batterien basieren auf zwei Flüssigelektrolyten, welche durch eine ionenpermeable Membran getrennt sind. Die in getrennten Kreisläufen vorliegenden Elektrolyte besitzen gegenüber einander ein elektrochemisches Potenzial und können durch den Ionenaustausch durch die Membran reduziert bzw. oxidiert werden. Die im System gespeicherte Energie lässt sich prinzipiell über das Volumen der Elektrolyte skalieren (Tanks), die abrufbare Leistung über die Kontaktfläche der Elektrolyte mit der Membran.

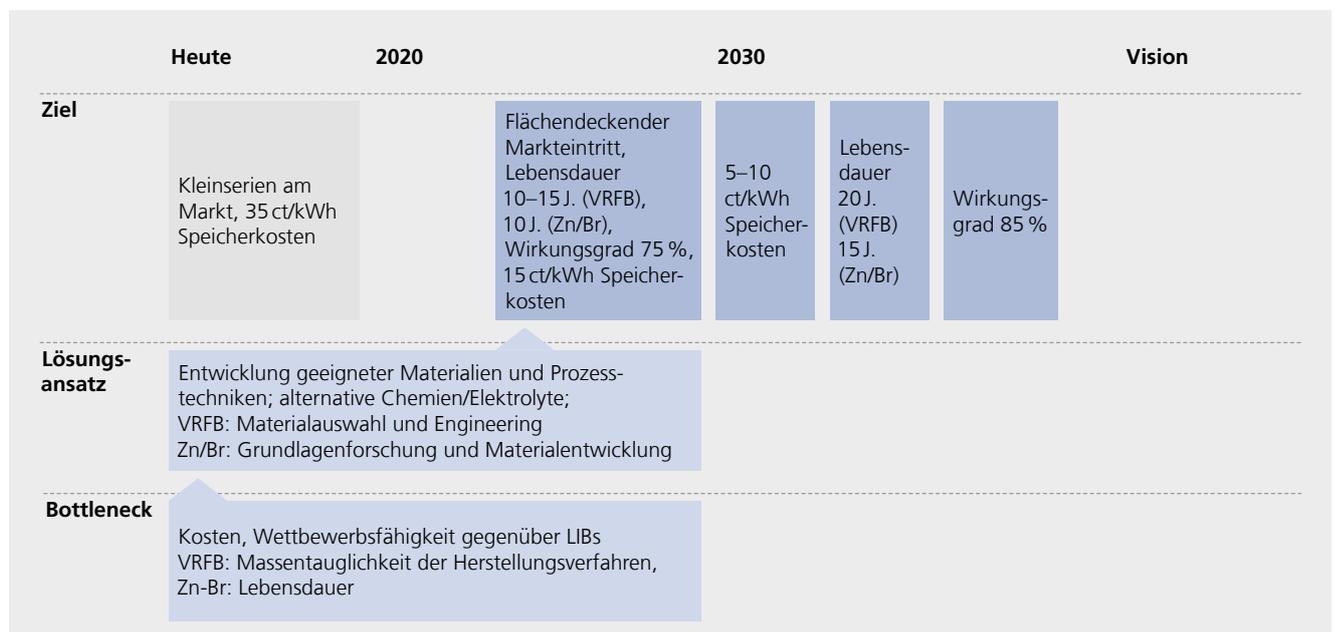
Technologie und Ziel

In Vanadium basierten RFB (VRFB) wird die Stabilität von Vanadiumionen in unterschiedlichen Valenzen ausgenutzt. An der positiven Elektrode kann vierwertiges Vanadylsulfat oxidiert werden, während an der negativen Elektrode V(III)-sulfat reduziert wird. Die Zellspannung liegt bei etwa 1,4V. Zn/Br-Akkumulatoren basieren der der Redoxreaktion von Zink, Brom und ihren

wässrig gelösten Ionen Zn_2^+ und Br^- . Die Zellspannung liegt bei etwa 1,7V. Der Entwicklungsstand beider Technologien wird auf TRL 7–8 eingeschätzt.

Ziel der Entwicklung ist die Bereitstellung von günstigen und langlebigen stationären Speichern. Eine deutliche Senkung der initialen Investitionskosten wird durch die Entwicklung skalierbarer und massenproduktionstauglicher Herstellungsverfahren und Materialien gesehen. Aktuell liegen LCOE-Kosten im Bereich 25–35 ct/kWh. Diese können in Zukunft auch durch die Erhöhung der Lebensdauer und Verbesserungen der Effizienz derartiger Systeme reduziert werden.

Die Bedeutung der VRFB für Deutschland und Europa wird als hoch eingeschätzt, da ein großes Interesse aus der Industrie für die Kommerzialisierung der Technologie besteht (Zn/Br gering). Die Wettbewerbsfähigkeit ist mittelmäßig, da sich viele der Marktakteure in China, Australien und Korea befinden (Zn/Br gering). Die Entwicklung Zn/Br-basierter Systeme wird in Deutschland insbesondere aufgrund der geringen Akzeptanz gegenüber dem Einsatz von Brom kaum verfolgt.



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Technologie mit hoher Lebensdauer und niedrigen Speicherkosten	Hohe Skalierbarkeit, gute Recyclingfähigkeit	TCO Kosten VRFB: Massentauglichkeit der Herstellungsverfahren, Zn/Br: Lebensdauer	VRFB: mittel, Engineering, Entwicklungskosten Zn/Br: hoch, Forschung	Kleinserien am Markt (TRL 7–8)	Spitzenlastverschiebung, Hausspeicher
	VRFB: Preisschwankungen Vanadium, Zn/Br: Lebensdauer	Entwicklung geeigneter Materialien und massentauglicher Prozesstechniken	Skalierbare Verfahren notwendig	Kurzfristig/am Markt	

Bottlenecks und Lösungsansätze

Für VRFB-Systeme liegen die wesentlichen Hürden im Bereich des Engineerings, insbesondere bei der Optimierung der Stackkonstruktion. Lösungsansätze werden hier in der Nutzung neuer Materialien wie leitfähiger Polymere und der Nutzung etablierter Herstellungsverfahren gesehen. Weiter können die Systemkosten durch die Verwendung mikroporöser Separatoren anstelle von ionenleitfähigen Membranen gesenkt werden.

Für die Optimierung von Zn/Br-Systemen bestehen grundlegendere Herausforderungen bezüglich der gegenwärtig begrenzten Lebensdauer. Hierzu sind zunächst Anstrengungen im Bereich der Grundlagenforschung nötig, welche ein besseres Verständnis der Reaktionen an den Elektroden ermöglichen, um im weiteren geeignete Materialien entwickeln zu können.

Der FuE-Aufwand für VRFB wird eher im Bereich Entwicklung gesehen und als mittelmäßig hoch eingestuft. Der Forschungsaufwand zum Verständnis und der möglichen Erhöhung der Lebensdauer von Zn/Br-Batterien wird als hoch eingeschätzt, wobei unklar ist, ob die bestehenden Schwierigkeiten überhaupt gelöst werden können.

Vorteile und Nachteile

Die Hauptvorteile gegenüber LIBs aber auch Blei-Säure-Batterien bestehen in einer höheren Lebensdauer (VRFB potenziell 15–20 Jahre, Zn/Br potenziell 10–15 Jahre) und niedrigeren Stromgestehungskosten beim Einsatz als stationärer Speicher. Aus technischer Sicht bietet die unabhängige Skalierbarkeit von Energie und Systemleistung von VRFB Möglichkeiten zu einer sehr guten Anpassung an gegebene Anforderungen. Der Aufbau beider Batteriearten lässt die einfache Rückgewinnung der Aktivsubstanzen zu, was insbesondere im Fall von vanadiumbasierten Systemen deutliche Kostensenkungen ermöglicht. Die Sicherheit der Systeme wird als gut eingestuft.

Als nachteilig wird die bislang kurze Erfahrung über Alterung und damit noch unklare Einschätzung der langfristigen Leistungsfähigkeit der Batterien eingeschätzt. Für Anwendungen mit Gewichts- oder Raumlimitierung besitzen RFB durch ihre niedrigen spezifischen Energiedichten deutliche Nachteile gegenüber LIBs.

Produzierbarkeit

Produktionsverfahren für beide Batterietypen existieren, für einige Komponenten jedoch im Pilotmaßstab. Es sind weiterhin hohe Investitionskosten nötig, um massentaugliche Verfahren zu entwickeln.

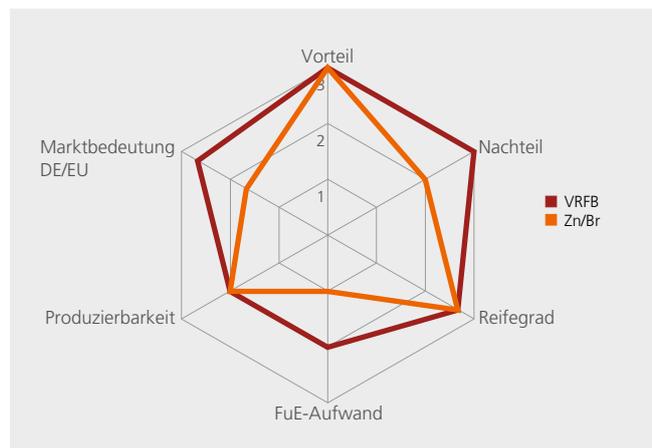
Anwendung

Anwendungsmöglichkeiten existieren bereits im Bereich der Spitzenlastverschiebung (Zeitskala ~h) auf regionaler Ebene oder als Hausspeicher (z. B. Schmid, Volterion). Aufgrund der Skalierbarkeit der Systeme werden auf allen Ebenen der stationären Speicherung Einsatzmöglichkeiten gesehen.

Zukünftige Technologieentwicklung

Die Hauptentwicklung der Systeme muss im Bereich der Lebensdauer erfolgen, sodass die LCOE-Kosten auf einen Wert von etwa 15 ct/kWh gesenkt werden können. Durch die Hochskalierung der Produktion wird erwartet, dass die Investitionskosten von derzeit 600–700 €/kWh (VRFB) bzw. 700 €/kWh (Zn/Br) bis 2025/2030 auf 400 €/kWh gesenkt werden können.

Aus Sicht der Leistungsparameter kann eine Steigerung der Leistungsdichte bezogen auf die Kontaktflächen von derzeit 80 mW/cm² (VRFB) auf 100–120 mW/cm² (2025/2030) und 150 mW/cm² (2050) bzw. 40 mW/cm² (Zn/Br) auf 60 mW/cm² (2025/2030) erfolgen.



NEUE BATTERIECHEMIEN

[35] BLEI-CARBON-AKKUMULATOREN

Gegenüber herkömmlichen Blei-Säure-Batterien (Pb-Elektrode) wird in PbC-Batterien eine Kombination von Blei und Kohlenstoffstrukturen als negative Elektrode eingesetzt. Das Funktionsprinzip wird als Kombination einer Blei-Säure-Batterie und eines asymmetrischen Superkondensators beschrieben. Zum einen verhindert die Mischung von Blei und Kohlenstoff die Sulfatierung der negativen Elektrode, was es erlaubt, die Batterie über längere Zeit ohne Ausgleichladung zu lagern. Zudem ist eine tiefere Entladung bei höheren Zyklenzahlen möglich. Weiterhin sind durch die Möglichkeit zur Ionenanlagerung in der Elektrolyt/C-Doppelschicht des Kohlenstoffanteils der Elektrode gegenüber herkömmlichen Blei-Säure-Systemen deutlich höhere Laderaten (C/2) möglich.

Technologie und Ziel

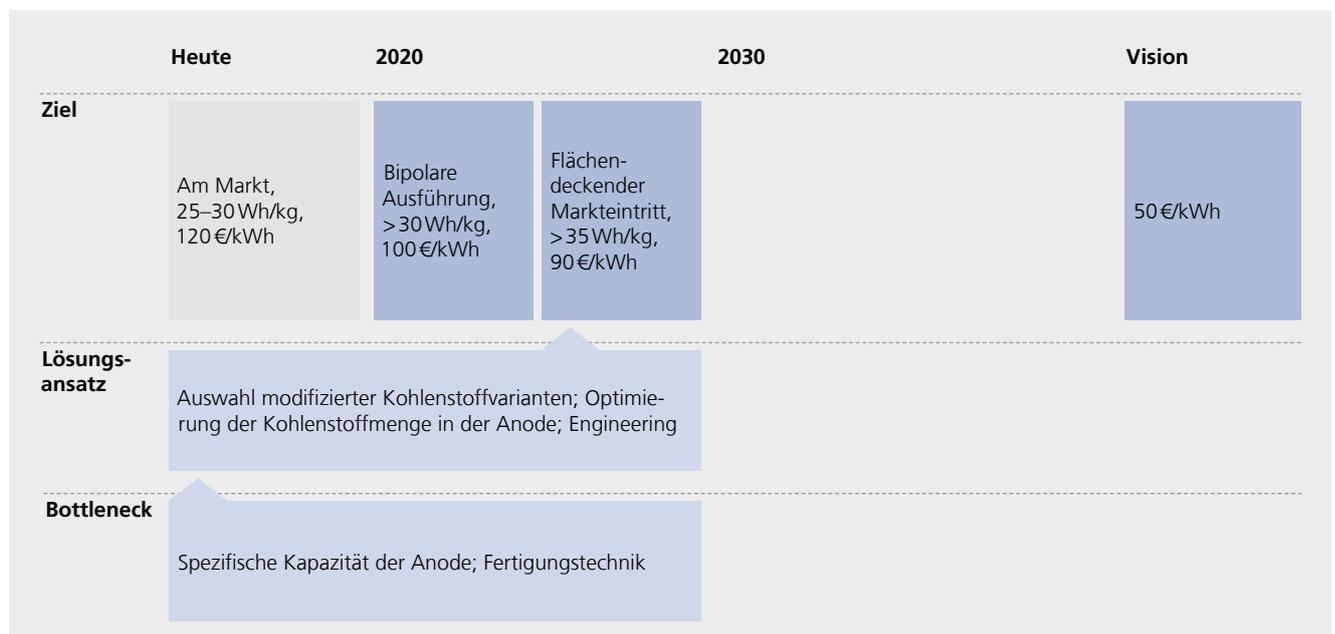
Das Ziel der Technologie ist die Weiterentwicklung bestehender Blei-Säure-Batterien, um Systeme mit niedrigeren Kosten, einer höheren Leistung und Sicherheit sowie größeren Flexibilität bei

der Nutzung, z. B. durch PSOC-Zyklisierung, zu erhalten. PbC-Batterien werden bereits von wenigen Herstellern kommerziell angeboten. Der Entwicklungsstatus wird daher auf TRL 8–9 eingeschätzt. Gegenwärtig verfügbare Zellen besitzen Energiedichten zwischen 25 und 30Wh/kg bzw. 70–80Wh/l und eine Lebensdauer von etwa 2000 Zyklen bei 80 % DOD.⁵¹

Pb als Rohstoff wird als vergleichsweise unkritisch angesehen. Aufgrund des bestens etablierten Recyclingkreislaufs für Pb von >95 % kann Material direkt aus dem Blei-Säure-Batterie-Recycling entnommen werden. Die Situation in Bezug auf Naturgraphit (Anode) ist vergleichbar zur Situation für LIBs. Die Bedeutung der Technologie für Deutschland und Europa wird als mittelmäßig hoch eingeschätzt. Wettbewerber befinden sich überwiegend im asiatischen Raum.

Bottlenecks und Lösungsansätze

Die größten Herausforderungen ergeben sich aus der niedrigen gravimetrischen Energiedichte. Die Kapazität der negativen Elektrode wird durch die Beimischung von Kohlenstoff oder den Einsatz reiner Kohlenstoffelektroden in Drei-Elektroden-



ZIEL UND VISION	VORTEIL/ NACHTEIL	BOTTLENECK/ LÖSUNGSANSATZ	FuE-AUFWAND/ PRODUZIERBARKEIT	REIFEGRAD/ MARKTNÄHE	FORMAT
Günstige und sichere Technologie für PSOC-Zyklen, Schnellladefähigkeit	Niedrige Materialkosten, hohe Lebensdauer, gute Recyclingfähigkeit	Niedrige gravimetrische Energiedichte der negativen Elektrode	Herstellungsprozess negative Elektrode, Fertigungsprozess Zelle	Am Markt (TRL 8–9)	ESS, Frequency Regulation, Load Levelling, Micro Hybrid
	Niedrige Energiedichte, aufwändiger Herstellprozess im Vgl. zu LAB	Bewertung und Auswahl modifizierter Kohlenstoffvarianten	Technologiebasis vorhanden Felderfahrung vorhanden	Kurzfristig/am Markt	

Konfiguration gegenüber herkömmlichen Blei-Säure-Systemen herabgesetzt. Lösungsansätze bestehen in der Bewertung und Auswahl modifizierter Kohlenstoffvarianten und der Entwicklung einer geeigneten Aktivmassenrezeptur, welche hinsichtlich des Bleianteils optimiert ist, während gleichzeitig die Vorteile der Kohlenstoffbeimischung nutzbar sind. Die Verwendung leitfähiger Kohlenstoffe ist mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden. Aktivkohlen mit hoher spezifischer Oberfläche beinhalten unerwünschte Verunreinigungen. Insgesamt muss ein optimales Verhältnis unterschiedlicher Materialien gefunden werden.

Die weitere Verbesserung des Systems kann durch einen Wechsel oder eine Optimierung der passiven Zellkomponenten erfolgen, wie beispielweise durch ein verändertes Stromableiterdesign oder durch die Aufbringung einer leitfähigen Graphitbeschichtung. Nachteile ergeben sich hierbei jedoch aus der aufwändigeren Fertigungstechnik. Der **FuE-Aufwand** im Bereich Entwicklung und Fertigungstechnik wird insgesamt als gering bis mittelmäßig hoch eingeschätzt.

Vorteile und Nachteile

Je nach technischer Ausgestaltung der Batterien ergeben sich unterschiedliche Vorteile verschlossener PbC-Akkumulatoren. Durch die Nutzung von Glasfließseparatoren und Flüssigelektrolyten können prinzipiell hohe Energiedichten erzielt werden. Der Wechsel zu Gelelektrolyten steigert zwar die Tiefentladefestigkeit, reduziert jedoch aufgrund des höheren Innenwiderstands derartiger Zellen deren Leistungsdichte. Bipolare Ausführungen weisen die höchsten Leistungsdichten auf, besitzen aber auch den größten Fertigungsaufwand.

Die Technologie steht im Wettbewerb zu LIBs. Die erzielten Eigenschaften PSOC-Zyklisierbarkeit und Leistungsfähigkeit, insbesondere Ladeakzeptanz können ebenfalls durch LIBs abgedeckt werden. Im Vergleich zu LIBs bestehen die Vorteile von PbC-Batterien in ihrem niedrigeren Preis pro kWh, ihrer hohen Sicherheit, guten Recyclingfähigkeit und eines geringeren Aufwands beim BMS. Da viele bestehende Anwendungen auf herkömmlichen Blei-Säure-Batterien basieren, fällt der Aufwand für den Umstieg auf PbC-Batterien gering aus. Nachteilig gegenüber LIBs erweist sich die geringere Energie- und Leistungsdichte von PbC-Batterien.

Produzierbarkeit

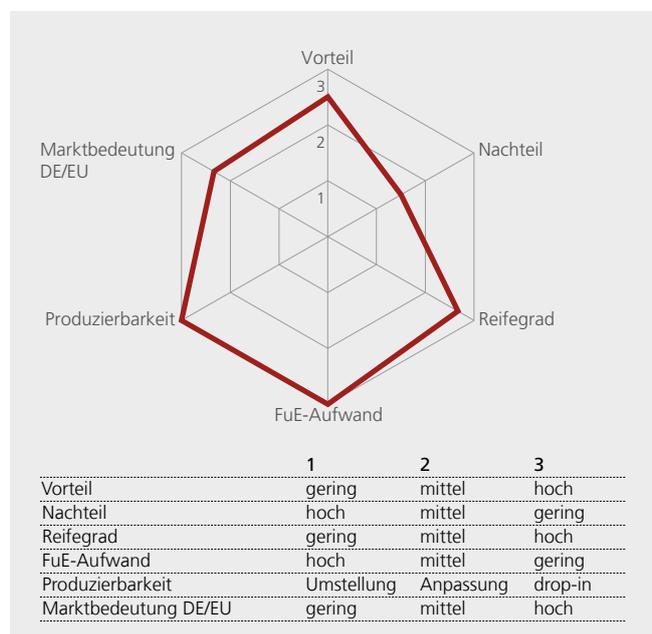
Bezogen auf etablierte Verfahren zur Herstellung von Blei-Säure-Batterien sind nur geringe Anpassungen bei der Fertigungstechnik notwendig.

Anwendungen

Anwendungsmöglichkeiten werden im Bereich Automotive als Starterbatterie oder als micro-hybrid-Speicher, sowie im stationären Bereich zur Netzstabilisierung (Last und Frequenz) gesehen.

Zukünftige Entwicklung und Vision

Zurzeit sind nur einige wenige Anbieter am Markt aktiv. Durch weitere Optimierungen, insbesondere bezüglich der Kohlenstoffmenge in der Anode kann ein flächendeckender Markteintritt 2025 bei einem Preis von 90€/kWh und einer Energiedichte von >35Wh/kg erfolgen. Die weitere Optimierung der Technologie erfolgt sowohl hinsichtlich der Leistungsparameter, jedoch hauptsächlich hinsichtlich der Kosten, welche perspektivisch auf bis zu 50€/kWh und somit unter die Ziele von LIBs gesenkt werden könnten.



FAZIT UND AUSBLICK

Die deutsche Batterieforschung hat in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt, um einen Schulterschluss zwischen der Material- und Prozessentwicklung für optimierte, künftige Lithium-Ionen-Batterien zu erreichen. Die damit verbundenen Herausforderungen bestehen darin, eine bessere Performance und Qualität bei reduzierten Kosten zu erzielen. Mit Blick auf die für automotive bzw. generell für zukünftige Mobilitätskonzepte geforderten Hochenergie-Batterien ergeben sich zudem weitere Anforderungen, z. B. bezüglich der Schnelladefähigkeit. Dabei ist es nicht zu verhindern, dass sich dies auch auf die Zyklenfestigkeit und Lebensdauer der Batterien auswirkt.

Als wesentliche Kriterien bei der Entwicklung von Hochenergie-Batterien steht daher vielmehr der Energiedurchsatz im Vordergrund, die Erhöhung der Energiedichte muss dabei mindestens die ggf. reduzierte Zyklenfestigkeit kompensieren. Dies wird für die in der Roadmap Hochenergie-Batterien 2030+ aufgezeigten Entwicklungspfade allerdings erwartet und die Mindestanforderungen der Automobilindustrie an diese Leistungsparameter dürften künftig erfüllt werden. Weiterhin liegen FuE-Herausforderungen für die Hochenergie-Batterieentwicklung nicht nur auf der Material-, Komponenten- und Prozessebene vor, sondern erfordern die Entwicklung abgestimmter Zellkomponenten und damit -konzepte und eine Betrachtung bis auf die Systemebene und spezifische Anwendung. Damit einher geht z. B. auch die Auswahl anwendungsspezifisch geeigneter Zellformate.

Die Roadmap Hochenergie-Batterien 2030+ zeigt auf, welche FuE-Herausforderungen für die Technologieentwicklung von Lithium-Ionen- bzw. lithiumbasierten Batterien bestehen und wie ein sukzessiver Wechsel aller Zellkomponenten (Kathode, Elektrolyt/Separator bis Anode) bis hin zu Feststoffbatterien gelingen kann.

Ein Fokus der FuE liegt dabei auf der Entwicklung von siliciumbasierten Anoden (Si/C) mit höherem Si-Anteilen. Ein Pre-treatment oder Pre-lithierung kann dabei helfen die Zyklenstabilität zu erhöhen und Additive bzw. den Elektrolytverbrauch zu reduzieren.

Ein weiterer Fokus liegt auf der Entwicklung von Feststoffbatterien mit Li-Metall-Anoden, um deutlich höhere Energiedichten (spätestens auf Systemebene) zu erzielen. Die Entwicklungen sind allerdings mit Risiken behaftet und erfordern noch prozess-technisch neue Lösungskonzepte. Die Suche und Entwicklung geeigneter Elektrolytmaterialien stehen dabei im Fokus, ebenso wie Materialdesigns, Zellkonzepte und neue Produktionstechnologien. Die Dynamik in diesem Feld hat sich in den letzten Jahren international stark entwickelt. Für die deutsche Batterieforschung stellt dieses Themenfeld ein zentrales Zukunftsfeld dar, in welchem sich künftig eine internationale Wettbewerbsfähigkeit auch der Batterieindustrie entwickeln könnte. Insbesondere mit Blick auf Elektrofahrzeug-Anwendungen stehen hybride und keramische Feststoffbatterien im Fokus und könnten ab 2030 Marktreife erlangen.

Neben den technischen sowie marktseitigen Potenzialen der Hochenergie-Batterien sind aber auch Risiken verbunden, wie die Gefahr in einseitige technologische Abhängigkeiten zu geraten. Bereits heute versuchen sich einige OEM den Zugang zu zentralen Batterierohstoffen wie Kobalt und Lithium für die kommenden Jahre zu sichern. Langfristig werden Aspekte der Ressourcenverfügbarkeit und Nachhaltigkeit nicht zuletzt aufgrund der damit verbundenen Kostenentwicklung für Batterien immer mehr an Bedeutung gewinnen. Die Entwicklungspfade der Hochenergie-NMC-basierten Batterien beinhalten bereits eine Reduktion kritischer Batterierohstoffe, allerdings werden auch das Recycling, 2nd-Use-Konzepte und neue, angepasste Geschäfts- bzw. Nutzungsmodelle der Energiespeicher dieses Thema immer stärker berücksichtigen müssen. Schließlich stellt sich die Frage nach der Rohstoffsubstitution und Verfügbarkeit alternativer Zellchemien und -konzepte.

Zwar ist eine große Palette an alternativen Technologien vorhanden und auch die theoretisch erreichbaren Leistungsparameter und geringe Kosten sind vielversprechend. Allerdings bestehen in der Praxis noch viele ungelöste Herausforderungen für deren Durchbruch disruptive Lösungen nötig sind. So begrenzen in der

Regel fehlende geeignete Elektrolyte die Entwicklung neuer Elektrodmaterialien und auch das Elektrodendesign stellt eine FuE-Herausforderung dar. Schließlich folgen selbst bei Lösung dieser Herausforderungen Fragen einer künftigen produktionstechnischen Umsetzung. Teilweise könnte jedoch auf Erfahrungen aus der LIB-Entwicklung zurückgegriffen werden.

Anhand der Langfristperspektiven zukünftiger Batterietechnologien zeigt sich dabei insgesamt, dass selbst bei einer Lösung der Herausforderungen und Erzielen entsprechender disruptiver Durchbrüche die Energiedichte bzw. der Energiedurchsatz alternativer Batterietechnologien zu lithiumbasierten Hochenergie-Batterien aus heutiger Sicht nicht den Anforderungen in automotiven Anwendungen gerecht würden.

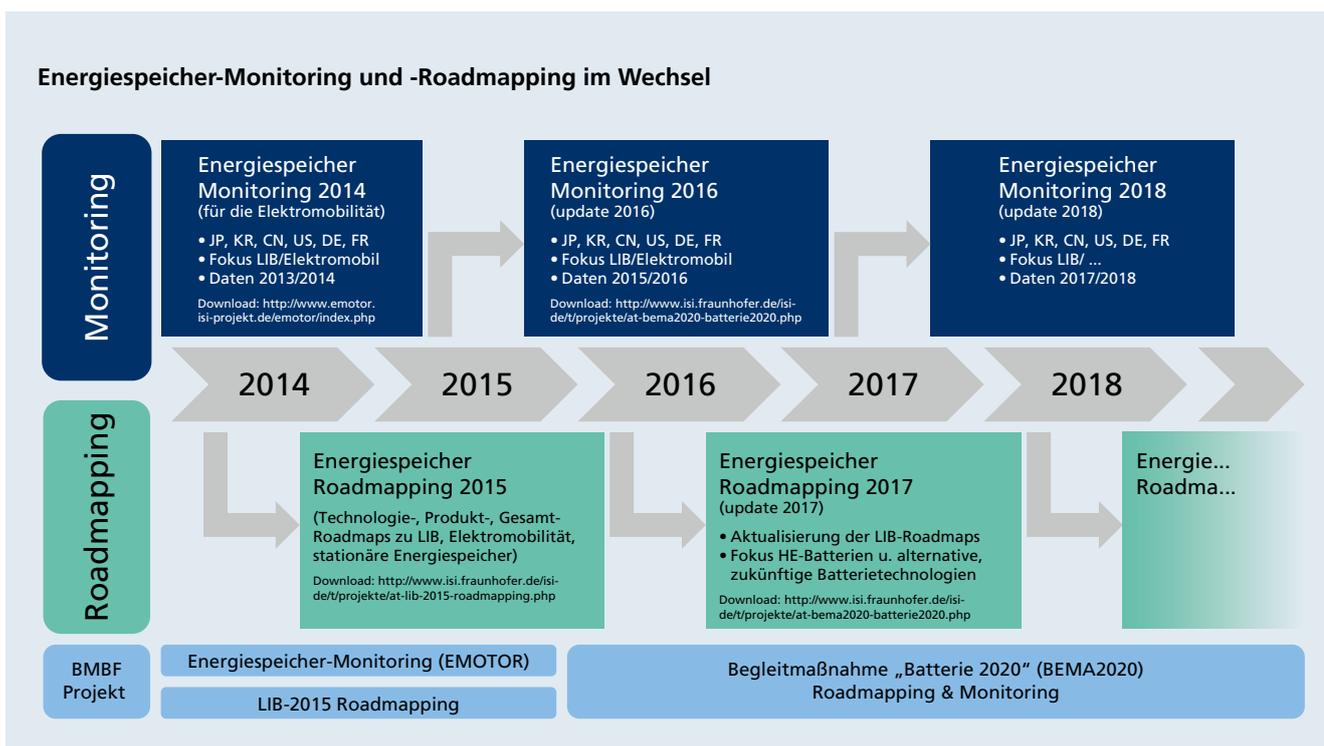
Für alternative Batterietechnologien ist aus heutiger Sicht in der Regel unklar, in welchen Anwendungen sie künftig Mehrwert erzielen können. Sie werden daher eher in Anwendungen gesehen, in welchen sie ihre jeweiligen spezifischen Vorteile wie geringe Kosten (z. B. natriumbasierte Batterien, RFB für stationäre Anwendungen), gravimetrische Energiedichte (z. B. Li-S für Fluganwendungen) etc. ausspielen können. Es zeichnen sich jedoch keine Technologien ab, welche Zukunftsmärkte in einer ähnlichen Breite adressieren könnten wie LIB.

Dennoch ist ein gewisser Benchmark an automotiven Hochenergie-Batterien wichtig: Einerseits, um kritisch zu reflektieren, welche physikalischen und systemischen Grenzen für diese Technologien vorliegen und welche Entwicklungen überhaupt als realistisch

erreichbar gesehen werden. Denn solange keine physikalischen Gründe gegen eine mögliche Nutzbarmachung alternativer Technologien sprechen, können diese in Zukunft anwendungsspezifische Technologiealternativen darstellen bzw. auch bei schlechteren Leistungsparametern Lösungen mit Blick auf Ressourcenverfügbarkeit und Nachhaltigkeit darstellen. Andererseits wäre zukünftig auch eine Anpassung oder Neubewertung der Anforderungen unter Berücksichtigung der genannten Nachhaltigkeitsaspekte nicht auszuschließen. Denn künftige alternative Batterietechnologien könnten dennoch bessere Leistungsparameter erreichen als Lithium-Ionen-Batterien heute.

Energiespeicher Monitoring und Roadmapping im Wechsel

Durch das im jährlichen Wechsel stattfindende Update von Energiespeicher-Roadmapping und internationalem Monitoring verfolgt das Fraunhofer ISI marktseitige ebenso wie technologie-seitige Entwicklungen im Bereich aktueller und zukünftiger Batterietechnologien. Das Energiespeicher-Monitoring gibt dabei eine jeweilige umfassende „Ist-Aufnahme“ im internationalen Kontext wieder und das Energiespeicher-Roadmapping dient als zeitliches Planungsinstrument. Das Monitoring und Roadmapping wird im Rahmen der BMBF Begleitmaßnahme „Batterie 2020“ gefördert. In 2018 ist das nächste Update des Energiespeicher-Monitoring geplant.



QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

- 1** Thielmann, A. (2016): Megatrends and their impact on the energy future from the perspective of electrochemical storage. AIP Conference Proceedings, Volume 1765, Issue 1.
- 2** European Commission (10/12/2017): A European Strategy for low-emission mobility (https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_en).
- 3** European Environment Agency (01/06/2017): EU greenhouse gas emissions from transport increase for the second year in a row (<https://www.eea.europa.eu/highlights/eu-greenhouse-gas-emissions-from-transport-increased>).
- 4** Thielmann et al. 2015: Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030, Fraunhofer ISI; Thielmann et al. 2016: Energiespeicher-Monitoring 2016 – Deutschland auf dem Weg zum Leitmarkt und Leitanbieter?; Avicenne 2013: The Worldwide rechargeable Battery Market 2012–2025, June 2013, 22nd Edition; Avicenne 2015: The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2014–2025, March 2015 & Battery Market Development for Consumer Electronics, Automotive, and Industrial: Materials Requirements and Trends, May/June 2015; Avicenne 2017: The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2016–2025, March 2017; weitere Marktstudien.
- 5** NiMH könnten im Bereich der AA und AAA Akkus im Heimbereich auch mittelfristig noch eine kleine Rolle spielen.
- 6** HEV wurden bereits vor 2010 in größeren Zahlen verkauft, jedoch wurde mit den in 2011 rd. 50 000 verkauften BEV/PHEV mit deutlich größerer Batteriekapazität als in HEV, erstmals mehr als 1 GWh Batteriekapazität durch verkaufte Elektroautos nachgefragt.
- 7** Thielmann et al. 2015: Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030, Fraunhofer ISI; Thielmann et al. 2016: Energiespeicher-Monitoring 2016 – Deutschland auf dem Weg zum Leitmarkt und Leitanbieter?; Avicenne 2013: The Worldwide rechargeable Battery Market 2012–2025, June 2013, 22nd Edition; Avicenne 2015: The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2014–2025, March 2015 & Battery Market Development for Consumer Electronics, Automotive, and Industrial: Materials Requirements and Trends, May/June 2015; Avicenne 2017: The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2016–2025, March 2017; weitere Marktstudien.
- 8** Thielmann, A.; Friedrichsen, N.; Hettesheimer, T.; Hummen, T.; Sauer, A.; Schneider, C.; Wietschel, M. (2016): Energiespeicher-Monitoring 2016. Deutschland auf dem Weg zum Leitmarkt und Leitanbieter? Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- 9** BNEF 2017: <https://www.bloomberg.com/professional/blog/clean-energy-goals-push-demand-batteries-metals/>; BNEF 2017: <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf>; B3 Corp 2015: Takeshita et al., Chapter 8 LIB-equipped Vehicle Market Bulletin (15Q4) and Long-term LIB Market Forecast; B3 Corp 2016: Takeshita et al., Chapter 8 LIB-equipped Vehicle Market Bulletin (16Q4) and Long-term LIB Market Forecast; Avicenne 2013: The Worldwide rechargeable Battery Market 2012–2025, June 2013, 22nd Edition; Avicenne 2015: The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2014–2025, March 2015 & Battery Market Development for Consumer Electronics, Automotive, and Industrial: Materials Requirements and Trends, May/June 2015; Avicenne 2017: The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2016–2025, March 2017; Roskill 2017: <http://www.ees-magazine.com/roskill-forecasts-li-ion-battery-market-to-reach-223gwh-by-2025/>; Roskill 2017: <https://www.westpac.com.au/news/in-depth/2017/11/carmageddon-may-be-closer-than-think/>; Lux 2017: <http://blog.luxresearchinc.com/blog/2017/07/transportation-and-stationary-energy-storage-will-overtake-consumer-electronics-as-the-largest-markets-for-energy-storage-by-2018/>.
- 10** Datenbank des Fraunhofer ISI auf Basis >50 Zellhersteller/Standorte/Ausbaustufen (Stand 01/12/2017), vgl. auch Michaelis, S.; Maiser, E.; Kampker, A.; Heimes, H.; Lienemann, C.; Wessel, S.; Thielmann, A.; Sauer, A.; Hettesheimer, T. (2016): VDMA Batterieproduktion, Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030, Update 2016. Frankfurt: VDMA Verlag GmbH.

- 11** Michaelis, S.; Maiser, E.; Kampker, A.; Heimes, H.; Lienemann, C.; Wessel, S.; Thielmann, A.; Sauer, A.; Hettesheimer, T. (2016): VDMA Batterieproduktion, Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030, Update 2016. Frankfurt: VDMA Verlag GmbH.
- 12** Problem with Gigafactory Leads to Global Shortage of Cylindrical Batteries (06/12/2017), <http://english.etnews.com/20171206200001>.
- 13** Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- 14** Es fanden zwei Roadmapping-Workshops in 2017 statt: „Hochenergie (HE)-Batterien“ für automotiv Anwendungen am 20.6.2017 in Frankfurt am Main und „Zukünftige Batterietechnologien“ am 18.7.2017 in Frankfurt am Main mit jeweils 15–20 nationalen Batterie-Experten.
- 15** Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015): Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- 16** NPE 2017: Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020, AG 4 – Normung, Standardisierung und Zertifizierung, April 2017.
- 17** Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- 18** Hettesheimer et al. 2017: Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Fraunhofer-Allianz Batterie 2017.
- 19** B3 Corp 2017: Takeshita et al., Chapter 5 LIB Materials Market Bulletin (17Q3).
- 20** B3 Corp 2017: Takeshita et al., Chapter 5 LIB Materials Market Bulletin (17Q3).
- 21** Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI; Hettesheimer et al. 2017: Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Fraunhofer-Allianz Batterie 2017. Diverse Marktstudien: u. a. B3 Corp (Takeshita et al.), total battery consulting (Anderman) sowie eigene Berechnungen.
- 22** B3 Corp 2016: Takeshita et al., Chapter 11 LIB Cell Materials Market Bulletin (16Q1); B3 Corp 2017: Takeshita et al., Chapter 5 LIB Materials Market Bulletin (17Q3).
- 23** Hettesheimer et al. 2017: Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Fraunhofer-Allianz Batterie 2017.
- 24** Im Gegensatz zu den Berechnungen der Fraunhofer-Allianz Batterie gehen wir in dieser Roadmap allerdings davon aus, dass diese Entwicklungen nicht bereits um 2025 sondern erst um 2030 erreicht werden bzw. erst zu einem späteren Zeitpunkt durch OEM bemustert und schließlich in Elektrofahrzeugen eingesetzt werden.
- 25** Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI; Hettesheimer et al. 2017: Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Fraunhofer-Allianz Batterie 2017. Diverse Marktstudien: u. a. B3 Corp (Takeshita et al.), total battery consulting (Anderman) sowie eigene Berechnungen.
- 26** Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI; Hettesheimer et al. 2017: Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Fraunhofer-Allianz Batterie 2017. Diverse Marktstudien: u. a. B3 Corp (Takeshita et al.), total battery consulting (Anderman) sowie eigene Berechnungen.
- 27** Hettesheimer et al. 2017: Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Fraunhofer-Allianz Batterie 2017.

28 Daten und Berechnungen zu den genannten Fahrzeugmodellen und Batterien wurden uns freundlicherweise vom Fraunhofer IISB zur Verfügung gestellt.

29 Die Diskussion der FuE-Herausforderungen und Lösungsansätze erfolgt in der vorliegenden Roadmap unter den genannten Prämissen bei einer Laderate von 1 C. Für die zukünftige Entwicklung der Batteriesysteme ist es jedoch auch möglich, dass Batteriesysteme mit einer geringeren Kapazität und somit auch Reichweite zum Einsatz kommen, die jedoch schneller wieder geladen werden können. Eine solche Änderung bei den Prämissen, weg von der Laderate 1 C hin zu höheren Laderaten, hätte auf die nachfolgende Betrachtung der Herausforderungen insbesondere auf die Vor- und Nachteile der Ansätze Auswirkungen, während die Bottlenecks oder der Aufwand eher nicht betroffen wären. Die durch hohe Stromstärken hervorgerufene thermische Belastung in den Zellen könnte z. B. noch stärker den Einsatz von stabilen bzw. keramischen oder keramisch gecoateten Separatoren [14] bedingen. Zusätzliche Vorteile durch eine höhere Laderate ergeben sich auch beim Flüssig-elektrolyt – Komponentenwechsel [10], bei welchen ggf. eine höhere Leitfähigkeit erreicht werden kann. Nachteile ergeben sich bei der Optimierung der Schichtdicke [4], da durch eine Limitierung der Li-Diffusion die Schnelladefähigkeit eingeschränkt ist. Bei dem Ansatz [6] Graphit-Optimierung kann es zu einem Lithium-Plating bei hohen Laderaten und niedrigen Temperaturen kommen, während es bei Ansatz [7] Si-Anteil erhöhen zu einer stärkeren Volumenänderung kommt. Im Fall von Ansatz [8] Li-Metall-Anoden kommt es durch die höheren Laderaten zu einem verstärkten Dendritenwachstum. Letztlich kann es bei Ansatz [15] inaktive Materialien zu einer eingeschränkten thermischen Belastbarkeit durch höhere Packungsdichten kommen, was eine optimierte Kühlung bedingen würde.

30 Bislang untersuchte Ionenleiter finden sich in den Materialklassen der Gläser, der anorganischen Keramiken (SCE solid ceramic electrolyte), und auch der Polymer-Metallsalz-Komplexe (SPE solid polymer electrolyte). Einige der bekannten Oxidkeramiken zeigen eine hohe Spannungsstabilität und erlauben somit die Nutzung von Hochvoltkathoden. Anodenseitig könnte die Verwendung von metallischem Lithium ermöglicht werden, wenn die festen Elektrolytschichten das Dendritenwachstum während der Zyklierung effektiv hemmen können. Eine generelle Schwäche

oxidkeramischer Feststoffbatterien ergibt sich aus der häufig niedrigen ionischen bulk-Leitfähigkeit und den hohen Grenzflächenwiderständen zwischen Zellkomponenten. Daher müssen solche Feststoffbatterien bei erhöhten Temperaturen betrieben werden. Im Bereich der sulfidbasierten Feststoffbatterien konnte durch eine entsprechende Anpassung des Übergangswiderstandes und eine hohe Leitfähigkeit jedoch schon Hochstromfähigkeit bei Raumtemperatur mit 60 C bei ca. 80 % Kapazitätserhaltung gezeigt werden.

31 Y. Kato et al., 2016, DOI: 10.1038/NENERGY.2016.30.

32 Die Nutzung von hybriden flüssigkeitsreduzierten Elektrolytsystemen stellt eine Zwischenform zwischen bisherigen lösungsmittelbasierten und festen Elektrolyten dar. Derartige Kombinationen können das Erreichen von für die Kommerzialisierung notwendigen Leistungsparametern beschleunigen, gehen jedoch auf Kosten der Batteriesicherheit, da dieselben, wenn auch abgeschwächt, Risiken bestehen wie bei der Nutzung komplett flüssiger Systeme.

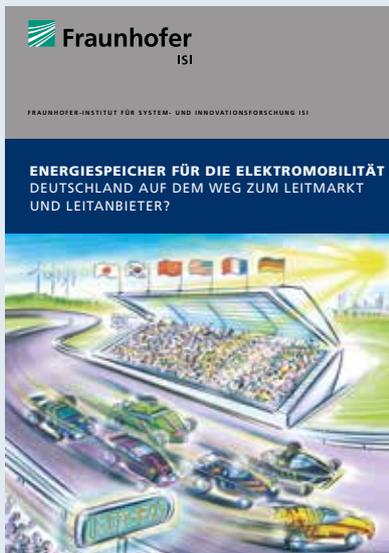
33 Der Technology Readiness Level (TRL), auf Deutsch als Technologie-Reifegrad übersetzt, ist eine Skala zur Bewertung des Entwicklungsstandes von neuen Technologien. Er gibt auf einer Skala von 1 bis 9 an, wie weit entwickelt eine Technologie ist. TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips; TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie; TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie; TRL 4: Versuchsaufbau im Labor; TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung; TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung; TRL 7: Prototyp im Einsatz; TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich; TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes.

34 Der Indikator Marktbedeutung setzt sich zusammen aus drei Indikatoren: (1) der Bedeutung für Deutschland/Europa, sich auf diese Herausforderung zu fokussieren, (2) der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands/Europas und (3) der Marktnähe, welche anhand des zeitlichen Abstands des erwarteten Markteintritts gegenüber heute/2017 aus der Roadmap entnommen ist.

35 D. Ma, Z. Cao, A. Hu, Nano-Micro Lett. 6, 2014, 347-358.

- 36** C. Bruckmeier, S. Haufe, F. Schauer, Wacker Chemie AG, DE102014203750 A1.
- 37** Wacker Chemie AG, DE201510215415 A1.
- 38** Thielmann, A.; Sauer, A.; Schnell, M.; Isenmann, R.; Wietschel, M. (2015): Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- 39** Sogenanntes „exploratives Roadmapping“ im Gegensatz zu dem „normativen Roadmapping“ für Hochenergie-Batterien, zu welchen in einem Zeitraum für die kommenden 15 Jahre sogenannte Red Brick Walls, zu lösende Ansätze definiert sind. Im explorativen Roadmapping wird von der Möglichkeit (i.d.R. wahrscheinlich) eintretender Entwicklungen ausgegangen.
- 40** Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- 41** Thielmann, A.; Sauer, A.; Schnell, M.; Isenmann, R.; Wietschel, M. (2015): Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.; Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- 42** Der Technology Readiness Level (TRL), auf Deutsch als Technologie-Reifegrad übersetzt, ist eine Skala zur Bewertung des Entwicklungsstandes von neuen Technologien. Er gibt auf einer Skala von 1 bis 9 an, wie weit entwickelt eine Technologie ist. TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips; TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie; TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie; TRL 4: Versuchsaufbau im Labor; TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung; TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung; TRL 7: Prototyp im Einsatz; TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich; TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes.
- 43** Der Indikator Marktbedeutung setzt sich zusammen aus drei Indikatoren: (1) der Bedeutung für Deutschland/Europa, sich auf diese Herausforderung zu fokussieren, (2) der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands/Europas und (3) der Marktnähe, welche anhand des zeitlichen Abstands des erwarteten Markteintritts gegenüber heute/2017 aus der Roadmap entnommen ist.
- 44** M.S. Whittingham, Chem Rev. 114, 2014, 11414–11443.
- 45** A. Kraytsberg, Y. Ein-Eli, J. Solid State Electrochem 21, 2017, 1907-1923, sowie J. Cabana, L. Monconduit, D. Larcher, M.R. Palacín, Adv. Mater. 22, 2010, E170–E192.
- 46** D. Andre et al., J. Mater. Chem. A. 3, 2015, 6709–6732.
- 47** Faradion: Prismatische (3Ah) und Pouch Zellen mit > 400 Zyklen. Kathodenmaterial: Schichtoxide, Anodenmaterial: Hard Carbons. Energiedichte im Bereich 120 Wh/kg. RS2E-network Frankreich: Zylindrische 18650 Zellen mit > 2000 Zyklen, Energiedichte im Bereich 90 Wh/kg.
- 48** Oxis-Energy Li-S Ultralight, Sion Power Licerion-Sulfur Batteries.
- 49** Al und Mg Luft Batterien benötigen für die Bildung der Metallhydride während der Zellentladung zusätzliches Wasser.
- 50** Polyplus Li-Air Battery, 120 Wh, 500 Wh/kg Pack, 800 Wh/kg Zelle.
- 51** Z.B. Narada REXC-2000 Ah.

PUBLIKATIONSÜBERSICHT

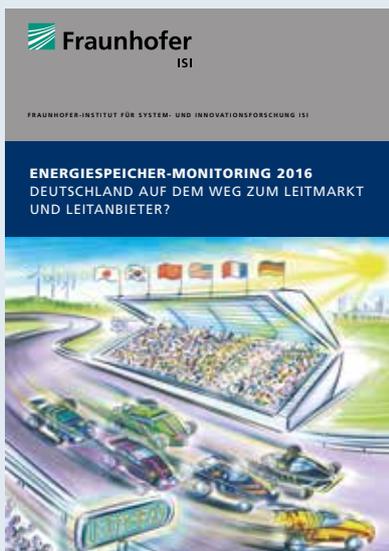


ENERGIESPEICHER-MONITORING 2014

<http://www.emotor.isi-projekt.de/>

Folgende Veröffentlichungen sind weiterhin über die EMOTOR-Webseite verfügbar:

- Trendbericht
- Bericht zur Produktion und Ökobilanzierung
- Länderbericht
- Strategiebericht



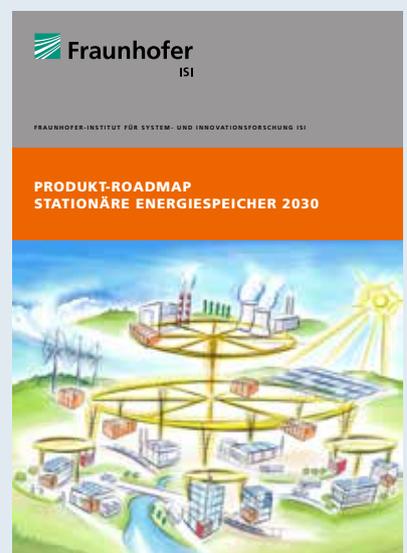
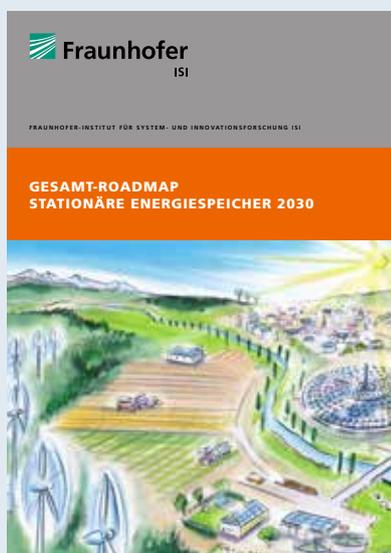
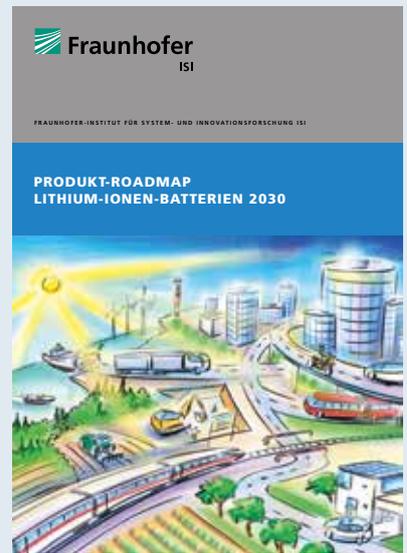
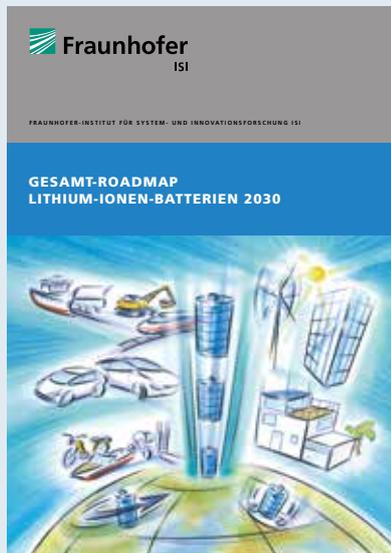
ENERGIESPEICHER-MONITORING 2016 (Update 2016)

Die vorliegende Veröffentlichung „Energiespeicher Monitoring 2016 – Deutschland auf dem Weg zum Leitmarkt und Leitanbieter?“ kann über folgenden Link heruntergeladen werden:

<http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/at-bema2020-batterie2020.php>

LIB-ROADMAPPING AM FRAUNHOFER ISI (LIB 2015)

<http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/at-lib-2015-roadmapping.php>



IMPRESSUM

Herausgeber

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

Förderung

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat 511, Neue Materialien; Batterie; KIT; HZG
53175 Bonn
www.bmbf.de
Förderkennzeichen: 03XP0040B

Projektträger

Projektträger Jülich (PtJ)
Geschäftsbereich Neue Materialien und Chemie (NMT)
52425 Jülich
www.fz-juelich.de

Ansprechpartner und wissenschaftliche Koordination

Dr. Axel Thielmann
Stellv. Leiter Competence Center Neue Technologien
Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI
Telefon +49 721 6809-299
axel.thielmann@isi.fraunhofer.de

Autoren

Dr. Axel Thielmann
Dr. Christoph Neef
Dr. Tim Hettesheimer
Dr. Henning Döscher
Prof. Dr. Martin Wietschel
Prof. Dr. Jens Tübke (Fraunhofer ICT)

Cover-Illustration

Heyko Stöber, Hohenstein

Druck

Stober GmbH, Eggenstein

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

Download

[http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/
at-bema2020-batterie2020.php](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/at-bema2020-batterie2020.php)

© Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI,
Karlsruhe, Dezember 2017

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

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

Heute beschäftigt das Fraunhofer ISI rund 210 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, darunter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Natur-, Ingenieur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, die pro Jahr an rund 400 Forschungsprojekten arbeiten. Das jährliche Budget, 22,5 Millionen Euro im Jahr 2016, wird vornehmlich durch Aufträge der nationalen und internationalen öffentlichen Hand, aus der Wirtschaft sowie von Stiftungen und Wissenschaftsorganisationen eingenommen.

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

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

