

*Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik |  
v2 vom 29. März 2018*

# **Technologiebericht**

## **3.3a Energiespeicher (elektrisch und elektro-chemisch)**

### **innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende**

---

Matthias Puchta

Tatjana Dabrowski

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

**Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:**

Puchta, M.; Dabrowski, T. (2018): Technologiebericht 3.3a Energiespeicher (elektrisch und elektro-chemisch). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

**Hinweis:**

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

**Kontakt:**

Dr. Kurt Rohrig  
Tel.: +49 561 / 7294 – 444  
E-Mail: kurt.rohrig@iwes.fraunhofer.de

Fraunhofer IWES  
Königstor 59  
34119 Kassel

**Review durch:**

Maike Schmidt (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden  
Württemberg )

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung (Steckbrief)</b>	<b>6</b>
<b>1 Beschreibung des Technologiefeldes</b>	<b>8</b>
1.1 Einleitung	8
1.2 Lithium-basierte Technologien	10
1.3 Natrium-basierte Technologien	10
1.4 Redox-flow Technologien	11
1.5 Ausgeschlossene Technologien	11
1.6 Techno-ökonomische Kenndaten	12
<b>2 Stand F&amp;E in Deutschland</b>	<b>15</b>
<b>3 Relevanz öffentlicher Förderung</b>	<b>20</b>
3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	20
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	22
<b>4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes</b>	<b>32</b>
4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	32
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen	36
4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	36
4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz	36
4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	36
4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	37
4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	45
4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	45
4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	46
4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität	46
<b>5 F&amp;E-Empfehlungen für die öffentliche Hand</b>	<b>48</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>51</b>


## Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Kenndaten Lithium-Ionen Batterie-----	13
Tab. 1-2	Kenndaten Vanadium-Redox-flow Batterie -----	13
Tab. 1-3	Kenndaten NaS Batterie -----	14
Tab. 1-4	Kostenentwicklung für die unterschiedlichen Batterietypen-----	14
Tab. 1-5	Ziele des SET-Plans für Lithium-Ionen Batterien (Elektromobilität)-----	14
Tab. 3-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der Redox-flow Technologie-----	21
Tab. 3-2	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der Na-basierten Technologien -----	21
Tab. 3-3	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der Li/Schwefel Technologie-----	22
Tab. 3-4	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der Li/Luft und post-Lithium-Ionen Technologien-----	22
Tab. 3-5	Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes elektrochemische Speicher-----	23
Tab. 3-6	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (Lithium-Ionen)-----	23
Tab. 3-7	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (NaS) -----	25
Tab. 3-8	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (NaNiCl)-----	25
Tab. 3-9	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (VRFB)-----	26
Tab. 3-10	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (Li/S)-----	28
Tab. 3-11	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (Li/Luft)-----	29
Tab. 3-12	Einsatz kritischer Rohstoffe im Technologiefeld elektrochemische Speicher (Zellebene, ohne Stromrichter und Systemkomponenten, Risikogruppe 3) nach DERA Rohstoffliste-----	31
Tab. 4-1	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologiegruppe Lithium-Ionen-----	38
Tab. 4-2	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologiegruppe Redox-flow-----	39
Tab. 4-3	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologiegruppe Na-basiert -----	39
Tab. 4-4	Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Energiespeicher – Input-Orientierung -----	43
Tab. 4-5	Wissenschaftliche F&E Aktivität-----	44
Tab. 4-6	Wirtschaftliche F&E Aktivität-----	44
Tab. 4-7	Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld elektrochemische Speicher zum Status Quo (2015)-----	45
Tab. 4-8	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes elektrochemische Energiespeicher -----	46
Tab. 4-9	Abhängigkeit des Technologiefeldes elektrochemische Speicher von Infrastrukturen -----	46

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Klassifizierung elektrochemischer stationärer Energiespeicher nach Energie und Leistung im Vergleich zu anderen Speichertechnologien -----	8
Abb. 1-2	Relevantes Energiespeichertechnologieportfolio nach Speichergößen und Lade-/Entladezeiten-----	9
Abb. 1-3	Anwendungsfelder und Geschäftsmodelle nach Speichergößen und Lade-/Entladezeiten-----	9
Abb. 2-1	Verteilung der Projekte auf die Kernherausforderungen auf der Materialebene-----	16
Abb. 2-2	Verteilung der Projekte auf die Kernherausforderungen auf der Systemebene -----	16
Abb. 2-3	Verteilung der Projekte auf die Kernherausforderungen auf der Integrationsebene-----	17
Abb. 2-4	Verteilung der Projekte auf die Kernherausforderungen auf allen drei Ebenen -----	18
Abb. 2-5	Onlineumfrage zum Forschungsbedarf nach Technologien -----	19
Abb. 3-1	Wichtigste verwendete Rohstoffe in elektrochemischen Speichern nach Technologien-----	31
Abb. 4-1	Übersicht über weltweite installierte, geplante, angekündigte und in Bau befindliche große stationäre Speichersysteme/Projekte im Themenfeld elektrochemische Speicher-----	33
Abb. 4-2	Übersicht über in Deutschland installierte, geplante, angekündigte und in Bau befindliche große stationäre Speichersysteme/ Projekte im Themenfeld elektrochemische Speicher-----	33
Abb. 4-3	Kumulierte Anzahl der Installationen von PV-Speichern in Deutschland von Mai 2013 bis April 2017 -----	34
Abb. 4-4	Anteil der Batterietechnologien der beim Speichermonitoring registrierten PV-Speicher nach Anzahl von Mai 2013 bis April 2017 -----	34
Abb. 4-5	Prognose für die Weltweite Marktentwicklung von Lithium-Ionen Batterien -----	35
Abb. 4-6	LCOE-Bewertungen unterschiedlicher Energiespeicher-----	35
Abb. 4-7	Erwarteter Anteil der Lithium-Ionen Zellhersteller am internationalen Markt für 2018 -----	38
Abb. 4-8	Budget nach Technologiefeld für die USA, Japan und IEA-Daten für 18 Länder Europas (inkl. Deutschland) (2014) -----	40
Abb. 4-9	F&E Budget im internationalen Vergleich für 2005 und 2014 -----	40
Abb. 4-10	Zeitliche Entwicklung des F&E Budgets für das Technologiefeld Energiespeicher für Deutschland, Japan und die USA -----	41
Abb. 4-11	Prognose des internationalen F&E Budgets (20 Länder inkl. Deutschland) von 1975-2015 -----	41
Abb. 4-12	F&E Budget der Europäischen Kommission (H2020 Förderung 2014 und 2015) (links) und nationale Förderung für 15 europäische Länder (inkl. Deutschland) (rechts) -----	42
Abb. 4-13	Zeitliche Entwicklung des gesamten F&E Budgets und des F&E Budgets für das Technologiefeld Energiespeicher für Deutschland -----	42
Abb. 5-1	Online-Umfrage: Höchstes Marktpotenzial und größter Forschungsbedarf für (a) Recycling und second-life, (b) Lithium-Ionen Technologie, (c) post-Lithium Technologien und (d) Batteriemangement -----	49
Abb. 5-2	Verteilung der in der EU durchgeführten F&E Projekte auf die drei Ebenen -----	50

## Zusammenfassung (Steckbrief)

<b>Technologiefeld Nr. 3.3a Energiespeicher (elektrisch und elektrochemisch)</b>																															
<b>A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&amp;E-Bedarf</b>																															
<b>Beschreibung des Technologiefeldes</b>																															
<p>– A: Lithium-basierte Technologien (Li-Ion, Li/Luft, Li/S)                  – B: Natrium-basierte Technologien (NaS, NaNiCl)                  – C: Redox-Flow-Technologien (VRF, Fe/Cr, Br/S, V/Br)                  Diese Technologien sind prinzipiell skalierbar und decken einen weiten Leistungsbereich (W-MW) ab.</p>																															
<p>Technologische Reife:                  – Lithium-Ionen, NaS, NaNiCl, VRFB: Kommerzialisierung (TRL=9)                  – Li/S: Demonstration (TRL=7)                  – Li/Luft: Technologieentwicklung (TRL=4)</p>																															
<p>Kritische Komponenten: im Wesentlichen alle elektrochemisch aktiven Komponenten, z. B. Elektroden, Elektrolyte, Separatoren; Zellfertigung; Batteriesystem: Batteriemanagementsystem inkl. SOH-Bestimmung, Sicherheit, Thermomanagement, Kosten.</p>																															
<b>Entwicklungsziele</b>																															
<p>Allgemein Verbesserung der spezifischen Energie und Leistungsdichte, Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Ressourceneffizienz (Material, Zelle, System). Reduktion der Kosten.</p>																															
<b>Technologie-Entwicklung</b>																															
<p><b>Ziele des SET-Plans ( Li-Ionen Batterien)</b></p> <table border="1" data-bbox="347 1361 1246 1787"> <thead> <tr> <th></th> <th>Einheit</th> <th>Heute</th> <th>2030</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gravimetrische Energiedichte (Pack)</td> <td>Wh/kg</td> <td>85 - 135</td> <td>&gt;250</td> </tr> <tr> <td>Volumetrische Energiedichte (Pack)</td> <td>Wh/l</td> <td>500</td> <td>&gt;500</td> </tr> <tr> <td>Lebensdauer</td> <td>a</td> <td>8 – 10</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Zyklenzahl (stationär)</td> <td></td> <td>1.000-3.000</td> <td>10.000</td> </tr> <tr> <td>Zyklenkosten (stationär)</td> <td>€/kWh/Zyklus</td> <td></td> <td>0,05</td> </tr> <tr> <td>Batteriepackkosten</td> <td>€/kWh</td> <td>180 - 285</td> <td>75</td> </tr> </tbody> </table> <p><i>Quelle: European Commission (2016)</i></p>					Einheit	Heute	2030	Gravimetrische Energiedichte (Pack)	Wh/kg	85 - 135	>250	Volumetrische Energiedichte (Pack)	Wh/l	500	>500	Lebensdauer	a	8 – 10	20	Zyklenzahl (stationär)		1.000-3.000	10.000	Zyklenkosten (stationär)	€/kWh/Zyklus		0,05	Batteriepackkosten	€/kWh	180 - 285	75
	Einheit	Heute	2030																												
Gravimetrische Energiedichte (Pack)	Wh/kg	85 - 135	>250																												
Volumetrische Energiedichte (Pack)	Wh/l	500	>500																												
Lebensdauer	a	8 – 10	20																												
Zyklenzahl (stationär)		1.000-3.000	10.000																												
Zyklenkosten (stationär)	€/kWh/Zyklus		0,05																												
Batteriepackkosten	€/kWh	180 - 285	75																												
<b>F&amp;E-Bedarf</b>																															
<p>Diverse F&amp;E Tätigkeiten auf der Material- (Elektroden, Elektrolyt), Zell- (Produktionsoptimierung) und Modul-Ebene (BMS-Algorithmen, thermisches Management, Betriebsführungsstrategien) notwendig.</p>																															

<b>B) Multikriterielle Bewertung</b>
<b>Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen</b> (gegenüber Referenz)
– Leisten einen entscheidenden Beitrag als mögliche Flexibilisierungsmaßnahme und sind damit relevant für die Befähigung des elektrischen Netzes die fortschreitende Integration von erneuerbaren Energien zu bewältigen. Der Beitrag ist also sehr hoch.
<b>Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz</b> (gegenüber Referenz)
– Leisten einen entscheidenden Beitrags, um einen hohen Anteil an erneuerbaren Energien zur ermöglichen und tragen damit indirekt zur Energie- und Ressourceneffizienz bei. – Kritische Rohstoffe: Vanadium, Graphit, Kobalt, Mangan, Palladium
<b>Kosteneffizienz</b> (gegenüber Referenz)
Keine Aussage möglich
<b>Inländische Wertschöpfung</b>
Deutschland deckt die gesamte Wertschöpfung bei Li-Ionen Batterien bis auf die Zellfertigung im großen Maßstab (Massenmarkt) ab. Eine Vielzahl von Unternehmen im Bereich der Materialherstellung und Produktionstechnologien in Deutschland vorhanden, insbesondere mit Blick auf Lithium-basierte Technologien und Redox-Flow Batterien.
<b>Stand und Trends von F&amp;E im internationalen Vergleich</b>
Wettbewerbsfähigkeit: Bei Zellfertigung von Li-Ionen Zellen sind deutsche Zellhersteller in Einzelanwendungen konkurrenzfähig. Bei Li-Ionen Batteriesystemen sind deutsche Hersteller wettbewerbsfähig. Bei Redox-Flow Batterien ist Deutschland mindestens wettbewerbsfähig. Insgesamt ist Deutschland im Europäischen Vergleich, gemessen an der Projektanzahl, sehr aktiv im Bereich F&E.
<b>Gesellschaftliche Akzeptanz</b>
– Gesellschaftliche und lokale Akzeptanz sind eher hoch. Die Marktakzeptanz liegt im Mittel, da regulatorische Rahmenbedingungen und mangelnde Vergütung der Flexibilität durch Speicher dem entgegen stehen. Weiterhin spielen dabei nach wie vor noch zu hohe Kosten eine Rolle.
<b>Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit</b>
– Elektrochemische Energiespeicher besitzen aufgrund der begrenzten Zyklfestigkeit und kalendarischen Lebensdauer eine typische wirtschaftliche Nutzungsdauer zwischen 10-20 Jahren. Aufgrund der Flexibilität der Systeme ist die Planungs- und Bauzeit relativ gering.
<b>Abhängigkeit von Infrastrukturen</b>
– Elektrisches Netz, Netzausbau. In Einzelfällen ggf. Alternative zum Netzausbau.
<b>Systemkompatibilität</b>
– Im Wesentlichen Bestimmt durch Leistungselektronik. Systemkompatibilität ist gegeben.

# 1 Beschreibung des Technologiefeldes

## 1.1 Einleitung

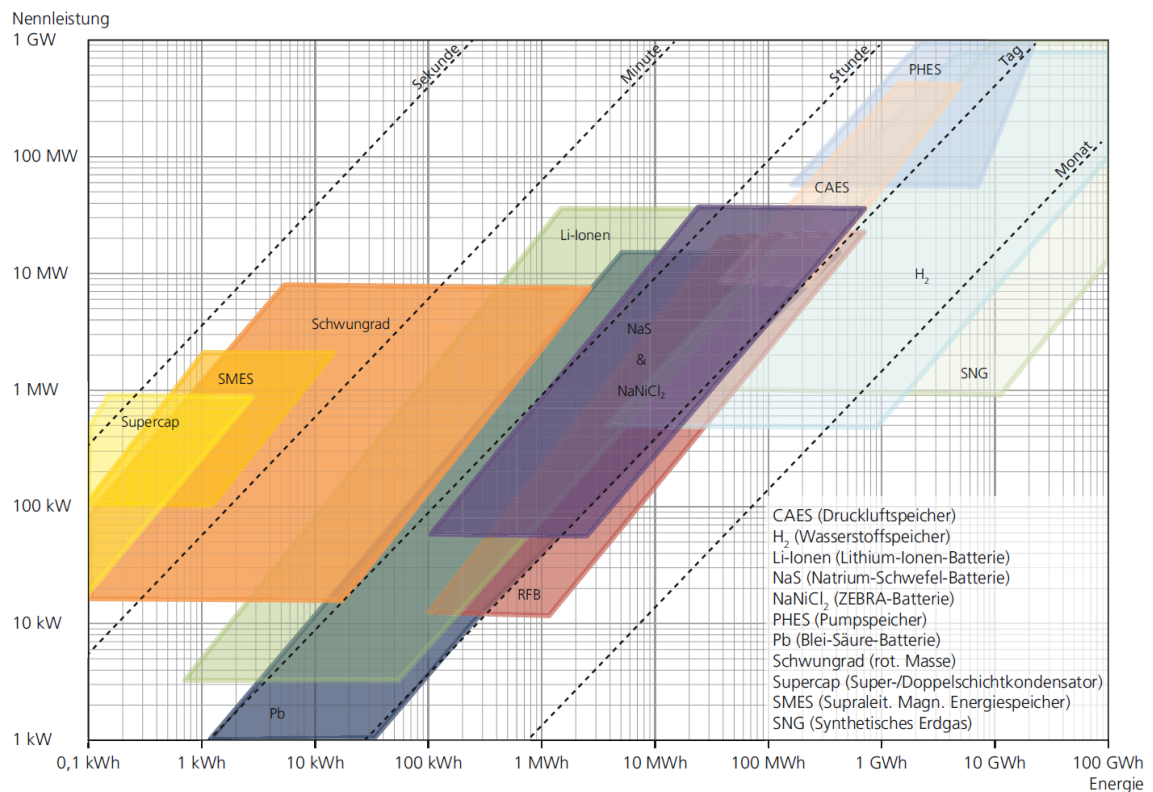
Das Technologiefeld umfasst im Rahmen des Berichtes die folgenden elektrochemischen Energiespeichertechnologien:

- Lithium-basierte Technologien (Li-Ion, Li/Luft, Li/S)
- Natrium-basierte Technologien (NaS, NaNiCl)
- Redox-flow-Technologien (VRF, Fe/Cr, Br/S, V/Br)

Folgende Speichertechnologien sind aufgrund deren Maturität/ Marktreife und/oder Toxizität aus diesem forschungsorientierten Bericht ausgeschlossen:

- Blei-Säure Technologien
- NiCd & NiMh Batterien

Das Technologiefeld elektrochemische Speicher zeichnet insgesamt eine flexible Skalierbarkeit der Energie und Leistung aus und reicht von Speichersystemen im Bereich von wenigen kW/ kWh (Kleinspeicher wie PV-Heimspeicher) bis hin und zu mehreren MW/MWh (Großspeicher, z. B. für Primärregelleistung) (Abb. 1-1).



**Abb. 1-1 Klassifizierung elektrochemischer stationärer Energiespeicher nach Energie und Leistung im Vergleich zu anderen Speichertechnologien**

Quelle: Thielmann et al. (2015)

Generell kann festgestellt werden, dass in den letzten 3-5 Jahren elektrochemische Speichersysteme höhere Leistungen und höhere Speicherkapazitäten aufweisen als in den Jahren davor, es ist also ein Trend hin zu größeren Systemen beobachtbar. Heutige Anwendungen für elektrochemische Speicher reichen dabei von PV-Heimspei-



cheranwendungen bis hin zur Primärregelleistung (Abb. 1-3). Anwendungsbereiche elektrochemischer Speicher unterscheiden sich insbesondere auch nach Technologien und stehen in dem jeweiligen Anwendungsbereich in Konkurrenz zu anderen Energiespeicheroptionen (Abb. 1-2).

Speichergröße Lade-/ Entladezeit	< 100 kWh	100 kWh – 1 MWh	1 MWh – 1 GWh	> 1 GWh
< 1 Stunde	Pb (Stand-by), LIB (zyklisch), Schwungrad, Super- caps (~s)	Pb, LIB (konv.)	Pb, Pumpspeicher, LIB	Nicht definiert
> 1 Stunde – 1 Tag	Pb, LIB, RFB, NaS, NaNiCl <sub>2</sub>	Pb, RFB, NaS, Na-NiCl <sub>2</sub> , NiMH, (künftig LIB)	Pb, NaS, NaNiCl <sub>2</sub> , Druckluft- und Pump- speicher, RFB (MWh), (LIB)	Druckluft- und Pump- speicher, sais. Wasser- und Gas/H <sub>2</sub> -Speicher
> 1 Tag – 1 Woche	RFB, NaS, NaNiCl <sub>2</sub>	RFB, NaS, NaNiCl <sub>2</sub>	Pumpspeicher	Sais. Wasser- und Gas/H <sub>2</sub> -Speicher
Langzeit	Technisch/Wirtschaftlich nicht sinnvoll	Technisch/Wirtschaftlich nicht sinnvoll	Sais. Wasser- und Gas/H <sub>2</sub> -Speicher	Sais. Wasser- und Gas/H <sub>2</sub> -Speicher

(grün: In Roadmap betrachtet, grau: Nicht in Roadmap betrachtet)

**Abb. 1-2 Relevantes Energiespeichertechnologieportfolio nach Speichergößen und Lade-/Entladezeiten**

Quelle: Thielmann et al. (2015)

Speichergröße Lade-/ Entladezeit	< 100 kWh	100 kWh – 1 MWh	1 MWh – 1 GWh	> 1 GWh
< 1 Stunde	Netzdienstl.; Leistungsspitzenpuffer; nicht-zykl. USV, Stand-by, Notstrom (48 V)	Netzdienstl., Peak Shaving/ Peak Load Shifting	Großinsellösungen; z. B. Primär-Regell.	Großes Potenzial international, nicht in DE
> 1 Stunde – 1 Tag	Autarkie, Mikro-Grid, USV mit 10 kWh; <10 kWh (Home Solar), >10 kWh (Quartiers- speicher)	Autarkie/Quartiers- speicher, EE-Integration, Backup-Lösungen (derzeit v. a. international)	EE-Integration, Insellösungen, Load Shifting	Zentrale Großspeicher (Arbitrage, Schwarz- start etc.)
> 1 Tag – 1 Woche	Off-Grid-Anwendungen, Inselssysteme (bis 3-Tagesspeicher)	Off-Grid-Anwendungen, Inselssysteme (bis 3-Tagesspeicher)	Zentrale. Großspeicher (z. B. Windenergie in Deutschland zur Flautenüberbrückung)	Zentrale Großspeicher
Langzeit	Technisch/Wirtschaftlich nicht sinnvoll	Technisch/Wirtschaftlich nicht sinnvoll	Zentrale Großspeicher	Zentrale Großspeicher

(grün: In Roadmap betrachtet, grau: Nicht in Roadmap betrachtet)

**Abb. 1-3 Anwendungsfelder und Geschäftsmodelle nach Speichergößen und Lade-/Entladezeiten**

Quelle: Thielmann et al. (2015)

Der Markt der kleineren Speichersysteme im Bereich weniger kW/kWh wird in den letzten Jahren insbesondere durch die Anwendung von Photovoltaik-Heimspeichersystemen geprägt (Abb. 4-3) und ein klarer Trend bei den PV-Heimspeichersystemen von der Blei-Säure-Technologie hin zur Lithium-Ionen-Technologie ist erkennbar (Abb. 4-4). Insbesondere in den letzten 4-5 Jahren ist eine große Zunahme an Projekten im Bereich elektrochemischer stationärer Speicher zu beobachten (Abb. 4-2).

## 1.2 Lithium-basierte Technologien

Unter den verschiedenen Typen der Lithium-Batterien sind die Lithium-Ionen-Batterien eine aktuelle und in der Anwendung befindliche Technologie. Die Entwicklungspotenziale dieser Technologie sind noch lange nicht ausgeschöpft. Die Post-Lithium-Ionen Batterien, welche Lithium in metallischer Form beinhalten, können die erwarteten Sprünge in der Energiedichte liefern. Hierfür müssen es diese Technologien von der Forschung in die Anwendung schaffen.

Das Funktionsprinzip der Lithium-Ionen-Batterie basiert auf dem Austausch von Lithium zwischen den Aktivmaterialien der Anode und Kathode. Bei der Entladung diffundiert Lithium vom Inneren der Kohlenstoffanode zu dessen Oberfläche. An der Grenzfläche zwischen Anode und Elektrolyt wandelt sich das Lithium in ein Lithium-Ion unter Freisetzung eines Elektrons um. Dieses Lithium-Ion wird über den Elektrolyten zur Kathode transportiert. Auf der Kathodenoberfläche wird ein Elektron aufgenommen, um Lithium zu bilden, das schließlich in das Innere der Kathode diffundiert und dort interkaliert. Der Ladevorgang findet vollständig analog in umgekehrter Richtung statt.

Dieses Prinzip teilen alle Lithium-Ionen-Batterien. Grundsätzlich anders funktionierenden Batterien, die Lithium in metallischer Form als Anode verwenden. Die Kathode kann beispielsweise eine Gasdiffusionselektrode (Li/Luft) oder schwefelhaltige Graphitstruktur sein (Li/S). Aufgrund des metallischen Lithiums ist der potenzielle Energiegehalt dieser Technologien wesentlich höher als bei den Lithium-Ionen-Batterien. Dies ist der Grund für die vielfältigen F&E-Tätigkeiten im Bereich der post-Lithium-Ionen-Batterien, die häufig die Leistungsfähigkeit und Stabilität der Technologien adressieren.

## 1.3 Natrium-basierte Technologien

Bei allen Hochtemperaturbatterien spielen der Elektrolyt und der Separator eine wesentliche Rolle in Bezug auf Leistungsdichte, Stabilität und Sicherheit. Natrium-basierte Thermalbatterien erfordern hohe Temperaturen für die Aufrechterhaltung des flüssigen Zustands (Elektroden und / oder Elektrolyt) und die Ionenleitfähigkeit des Separators. So wird der große Vorteil einer vernachlässigbaren Selbstentladung durch die thermischen Verluste und den Energiebedarf der Heizung des Batteriesystems reduziert. Darüber hinaus sind Thermalbatterien wirtschaftlich Anwendbar meist auf Systeme im großen Maßstab beschränkt, um die Oberfläche und damit die thermischen Verluste zu minimieren.

Um ihr Potenzial einer sehr niedrigen Entladungsrate, einer hohen Zykluszahl, langer Lebensdauer sowie einer relativ einfachen Produktion voll ausschöpfen zu können, müssen Niedertemperatur-Materialien entwickelt werden. Das kostengünstige

und hochverfügbare aktive Material, insbesondere im Vergleich zu Lithium, macht die Thermalbatterie zu einem vielversprechenden Kandidaten für eine langfristige Technologie in der stationären Energiespeicherung.

#### 1.4 Redox-flow Technologien

Redox-flow-Batterien (RFB) entsprechen vom Funktionsprinzip wieder aufladbaren Brennstoffzellen. Ein großer Vorteil der Redox-flow-Batterie gegenüber herkömmlichen Batteriesystemen, insbesondere für die großflächige stationäre Energiespeicherung, ist die Trennung von Leistung (Wahl der Reaktanten und Konzentrationen) und Energie (Größe der Tanks mit skalierbarem Volumen), also Reaktionsort und Lagerung. Auf diese Weise kann eine Erhöhung des Volumens und damit der gespeicherten Energie auf einfache und kostengünstige Weise erfolgen.

Die Reaktanten und Produkte sind Konfigurationen derselben Spezies in verschiedenen Oxidationsstufen in jeder Halbzelle. Da die aktiven Materialien in den Elektrolyten aufgelöst werden und der Elektronentransfer zwischen der gelösten aktiven Spezies und der festen Elektrode stattfindet, finden keine (De-)Interkalations- und Festkörper-Diffusionsprozesse statt (ähnlich Brennstoffzellen) und die Elektrodendegradation wird minimiert. Darüber hinaus bieten Redox-flow-Batterien ein schnelles Ansprechverhalten sowie breite Leistungs- und Entladezeitbereiche (breiter Anwendungsbereich), geringe Selbstentladungsraten durch die Lagerung in externen Tanks und ein hohes Maß an Sicherheit durch die durchflussgesteuerte Reaktion. Dennoch machen ihre geringe Leistungsdichte und ihre Energiedichte sie für mobile Anwendungen ungeeignet.

#### 1.5 Ausgeschlossene Technologien

Als Indikator für das weltweite Interesse an spezifischen Forschungsthemen kann der durchschnittliche Anstieg (in den letzten fünf Jahren) wissenschaftlicher Publikationen genutzt werden. Insbesondere das Interesse an so genannten Zukunftstechnologien wie Lithium/Luft (ca. 118 %) und Lithium/Schwefel (100 %) hat deutlich zugenommen. Auch das Interesse an alternativen Technologien wie Hochtemperatur-Batterie wie Natrium/Nickelchlorid (45 %) und Natrium/Schwefel (35 %) und insbesondere Redox-flow-Batterien (50 %) ist gestiegen. Im Gegensatz dazu ist das Interesse an Blei-Säure-Batterien nur um 20 % gestiegen, was dem durchschnittlichen Anstieg der Publikationen mit dem Begriff Batterien ist. Das Interesse an NiMH-Technologien hat einen Rückgang um 4 % erlebt (Schledde et al. 2016).

Ein weiterer Indikator ist die Wachstumsrate (weltweit) von batteriebezogenen Patenten. In den letzten fünf Jahren stiegen die Hochtemperatur-Batteriepatente um ca. 63 %, Redox-flow-Batterie verwandte Patente stiegen um 60 %, Patente im Zusammenhang mit Lithium-basierten Technologien stiegen im Bereich von 20-57 % (alle Typen von Lithium-basierten Batterien), während Nickel (Cd/MH) und Blei-Säure-Batterie bezogene Patente nur um 5 % und 10 % anstiegen. Dies entspricht einem Anstieg unterhalb des durchschnittlichen Anstiegs der Batteriepatente (20 %) weltweit (Schledde et al. 2016).

Des Weiteren ist die Maturität der ausgeschlossenen Technologien Ni (Cd/MH) und Blei-Säure zu nennen. Besonders deutlich wird diese Tatsache an der Blei-Säure Bat-

terie, deren Forschungsschwerpunkte die Entsorgung darstellen und das Recycling (Li et al. 2016, Tian et al. 2014, van der Kuijp et al. 2013, Liu et al. 2014, McKenna et al. 2013). Forschung in Hinblick auf die Optimierung der Technologie findet nur noch bedingt und auf einem sehr hohen Niveau statt. Aufgrund ihrer geringen Kosten ist die Blei-Säure Batterie jedoch nach wie vor weit verbreitet.

Die Ni / MH Technologie ist insbesondere für Anwendungen von Interesse, die eine hohe Leistungsdichte erfordern (Elektrowerkzeuge, Hybrid- und Elektrofahrzeuge). Trotz der geringen Kosten, flexiblen Baugrößen und einfachen Austauschbarkeit wird mit steigender Maturität der Lithium-Ionen Technologie auch dieser Batterietyp zunehmend ersetzt. Aufgrund des mittlerweile auf nationaler Ebene umgesetzten Verbotes für Batterien, die auf dem toxischen Schwermetall Cadmium basieren, wird die Ni / Cd Technologie nicht weiter verfolgt.

## 1.6 Techno-ökonomische Kenndaten

Die folgenden Tab. 1-1 bis Tab. 1-3 zeigen anhand von Beispielen aus den drei Technologiegruppen für stationäre Speicher die techno-ökonomischen Kenndaten (Thielmann et al. 2015). Die derzeitigen Kosten pro kWh und ihre Entwicklung bis 2030 sind in Tab. 1-4 zusammengefasst (Fuchs et al. 2012). Des Weiteren sind in Tab. 1-5 basierend auf dem Strategic Energy Technology (SET) Plan der Europäischen Kommission zur Beschleunigung der Entwicklung CO<sub>2</sub>-armer Technologien die aufgestellten Ziele für elektrochemische Speicher im Bereich der Elektromobilität aufgeführt (European Commission 2016).

Die Definition der einzelnen Kenngrößen ist im Folgenden kurz erläutert:

### Leistung

Die Leistung eines Energiespeichers (in W) bezeichnet die Menge der elektrischen Energie, die pro Zeit zur Verfügung steht. Diese besitzt eine besonders hohe Relevanz für Anwendungen, bei denen die Leistungsbereitstellung im Vordergrund steht.

### Energie

Die Energie eines Energiespeichers (in Wh) bezeichnet die Nennkapazität des Speichers (vom Hersteller angegebene gespeicherte elektrische Ladung) multipliziert mit der Nennspannung (vom Hersteller angegebene Spannung im Normalbetrieb). Diese besitzt eine besonders hohe Relevanz für Anwendungen, bei denen die Energiebereitstellung im Vordergrund steht.

### Gravimetrische Energiedichte

Die gravimetrische Energiedichte bezeichnet das Verhältnis von Energie (in Wh) und Masse eines Stoffes (in kg). Diese besitzt eine hohe Relevanz für Anwendungen, in denen das Gewicht der Energiespeichertechnologie im Vordergrund steht.

### Volumetrische Energiedichte

Die volumetrische Energiedichte bezeichnet das Verhältnis von Energie (in Wh) und Raumvolumen eines Stoffes (in l). Diese besitzt eine hohe Relevanz für Anwendungen, in denen die Größe der Energiespeichertechnologie im Vordergrund steht.

### Effizienz (Lade- Entladewirkungsgrad)

Die Effizienz bezeichnet das Verhältnis von entnehmbarer Ladung und der beim Ladevorgang zugeführten Ladung (Energieverluste durch Wärmeentwicklung). Ein hoher Wirkungsgrad und damit eine Minimierung der thermischen Verluste werden auch im Fall der elektrochemischen Speicher angestrebt.

### Lebensdauer

Die Lebensdauer bezeichnet den Zeitraum (in a) der Verwendung einer Batterie bis die Restkapazität auf 70 – 80 % (keine einheitliche Definition) abgesunken ist.

### Zyklenzahl

Die Zyklenzahl bezeichnet die Anzahl der Lade- und Entladezyklen innerhalb der Lebensdauer eines Akkumulators und bis zur Erreichung einer Restkapazität zwischen 70 und 80 % (keine einheitliche Definition). Unter dem Gesichtspunkt der Kosten wird natürlich eine hohe Lebensdauer, aber auch eine hohe Zyklenzahl der verwendeten Technologie angestrebt.

**Tab. 1-1 Kenndaten Lithium-Ionen Batterie**

	Einheit	Heute
Leistungsbereich	MW	0,001 - 10
Energiebereich	MWh	0,001 - 10
Gravimetrische Energiedichte	Wh/kg	60 – 200
Volumetrische Energiedichte	Wh/l	200 - 400
Effizienz	%	85 - 90
Lebensdauer	a	5 – 20
Zyklenzahl		500 – 3.000

Quelle: Thielmann et al. (2015)

**Tab. 1-2 Kenndaten Vanadium-Redox-flow Batterie**

	Einheit	Heute
Leistungsbereich	MW	0,050 - 20
Energiebereich	MWh	skalierbar
Gravimetrische Energiedichte	Wh/kg	15 - 50
Volumetrische Energiedichte	Wh/l	20 - 70
Effizienz	%	60 - 75
Lebensdauer	a	5 - 20
Zyklenzahl		> 10.000

Quelle: Thielmann et al. (2015)

**Tab. 1-3 Kenndaten NaS Batterie**

	Einheit	Heute
Leistungsbereich	MW	0,030 - 10
Energiebereich	MWh	0,1 - 100
Gravimetrische Energiedichte	Wh/kg	100 - 250
Volumetrische Energiedichte	Wh/l	150 - 300
Effizienz	%	70 - 85
Lebensdauer	a	10 – 15
Zyklenzahl		2.500 – 4.500

Quelle: Thielmann et al. (2015)

**Tab. 1-4 Kostenentwicklung für die unterschiedlichen Batterietypen**

	Heute	2030
Lithium-Ionen		
Energieinstallationskosten / €/kWh	300 - 800	150 - 300
Leistungsinstallationskosten / €/kW	150 - 200	35 - 65
Vanadium-Redox-flow		
Energieinstallationskosten / €/kWh	300 - 1000	70 - 150
Leistungsinstallationskosten / €/kW	1.000 – 1500	600 – 1.000
NaS		
Energieinstallationskosten / €/kWh	500 - 700	80 - 150
Leistungsinstallationskosten / €/kW	150 – 200	35 – 65

Quelle: Thielmann et al. (2015)

**Tab. 1-5 Ziele des SET-Plans für Lithium-Ionen Batterien (Elektromobilität)**

	Einheit	Heute	2030
Gravimetrische Energiedichte (Pack)	Wh/kg	85 - 135	>250
Volumetrische Energiedichte (Pack)	Wh/l	500	>500
Aufladezeit	min	30	3
Lebensdauer	a	8 – 10	20
Zyklenzahl (stationär)		1.000-3.000	10.000
Zyklenzahl			5.000
Zyklenkosten (stationär)	€/kWh/Zyklus		0,05
Batteriepackkosten (Elektromobilität)	€/kWh	180 - 285	75

Quelle: European Commission (2016)

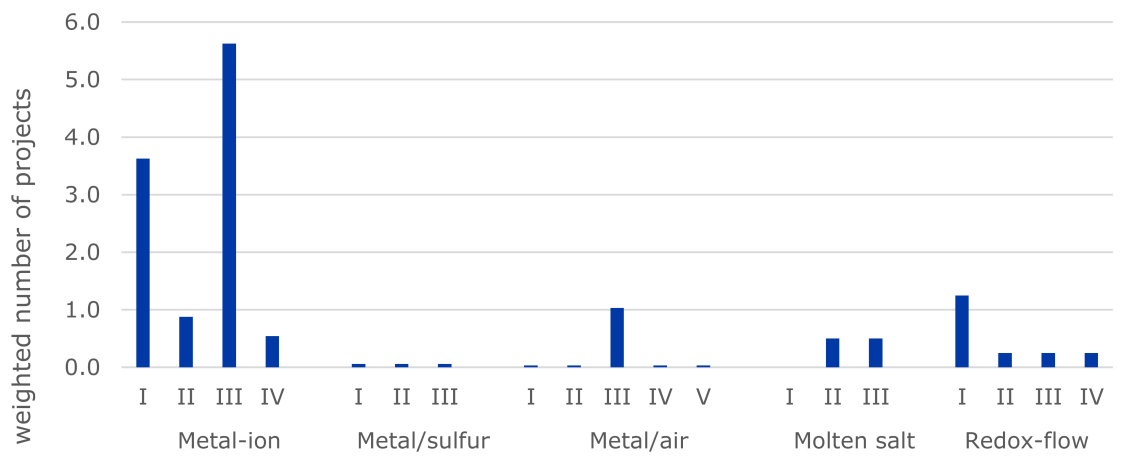
## 2 Stand F&E in Deutschland

Zur Einschätzung des F&E Standes in Deutschland wird die in 2016 veröffentlichte technische Analyse, die im Rahmen des BATSTORM Projektes der Europäischen Kommission durchgeführt wurde (Schledde et al. 2016), herangezogen. Über die Hälfte der in BATSTORM berücksichtigten Projekte werden/wurden ausschließlich in der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt, die Mehrheit der verbleibenden Projekte besitzt mindestens einen deutschen Konsortialpartner, so dass die vorliegende Studie auch für den nationalen F&E Stand als repräsentativ betrachtet werden kann.

Im Rahmen des BATSTORM Projektes wurden auf Basis weltweiter wissenschaftlicher Publikationen die im Fokus der Wissenschaft stehenden elektrochemischen Energiespeichertechnologien als auch die einhergehenden Herausforderungen herausgearbeitet. Letztere werden als kritisch für die Verbesserung derzeitiger elektrochemischer Energiespeicher als auch für die Verwirklichung zukünftiger Technologien angesehen. Diese Kernherausforderungen teilen sich auf drei Ebenen auf.

- Die *Materialebene* widmet sich auf Zellniveau der Verbesserung und Entwicklung neuer Materialien für Elektroden, Elektrolyten, Separatoren, Katalysatoren etc.
- Auf der *Systemebene* werden das thermische und elektrische Management, Sicherheitsfragen, die Batteriezustandserkennung, Korrosion und Batteriefertigung und -design untersucht.
- Die *Integrationsebene* behandelt vor allem die Integration der elektrochemischen Speicher in das bestehende Netz (Energiemanagement, Kontrollalgorithmen und Kommunikationsinfrastruktur), wobei jedoch Konzepte wie grid-to-vehicle (G2V), vehicle-to-grid (V2G), second-life und hybride Systeme ebenfalls berücksichtigt werden. Die Studie ist unter (Schledde et al. 2016) abrufbar.

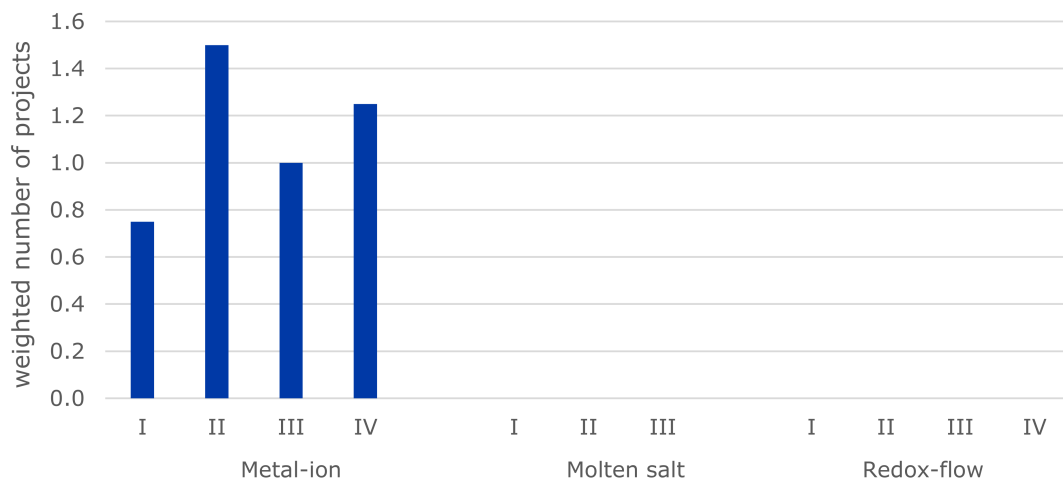
Die Verteilung der in der EU durchgeführten Projekte auf die Kernherausforderungen ist in den folgenden drei Abb. 2-1 – Abb. 2-3 dargestellt. Diese wurden der BATSTORM Studie entnommen.



- |  |  |  |
|--|--|--|
| <p><u>Metal-ion</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>I: Cathode materials/design</li> <li>II: Expensive additives</li> <li>III: Anode materials/design</li> <li>IV: Electrolyte stability</li> </ul> | <p><u>Metal/sulfur</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>I: Cathode materials/design</li> <li>II: Anode materials/design</li> <li>III: Insulating byproducts</li> </ul> | <p><u>Metal/air</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>I: Cathode materials/design</li> <li>II: Anode materials/design</li> <li>III: Electrolyte stability</li> <li>IV: Solubility and diffusivity</li> <li>V: Cell poisoning</li> </ul> |
| <p><u>Molten salt</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>I: Insulating byproducts</li> <li>II: Low-temperature electrolyte</li> <li>III: Low-temperature separator</li> </ul>                          | <p><u>Redox-flow</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>I: Electrode design</li> <li>II: Solubility</li> <li>III: Shunt currents</li> <li>IV: Membrane</li> </ul>        |  |

**Abb. 2-1 Verteilung der Projekte auf die Kernherausforderungen auf der Materialebene**

Quelle: Schledde et al. (2016)



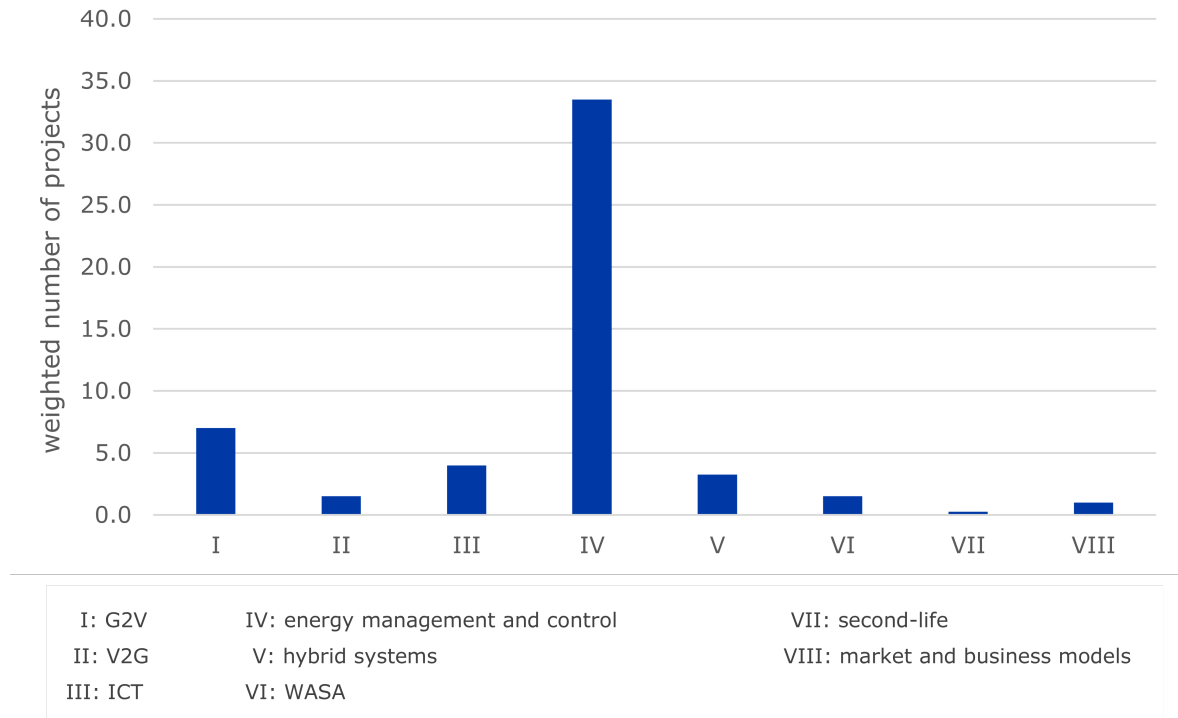
- |  |   |  |
|--|---|--|
| <p><u>Metal-ion</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>I: Electrical management</li> <li>II: Thermal management and safety</li> <li>III: Battery state estimation</li> <li>IV: Assembling standards</li> </ul> | <p><u>Molten salt</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>I: Thermal insulation</li> <li>II: Battery state estimation</li> <li>III: Corrosion</li> </ul> | <p><u>Redox-flow</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>I: Uniform material delivery</li> <li>II: Pumps and tanks</li> <li>III: Battery state estimation</li> <li>IV: Corrosion</li> </ul> |
|--|---|--|

**Abb. 2-2 Verteilung der Projekte auf die Kernherausforderungen auf der Systemebene**

Quelle: Schledde et al. (2016)



Aus Abb. 2-1 und Abb. 2-2 wird ersichtlich, dass der derzeitige F&E Fokus auf der Weiterentwicklung der Lithium-Ionen Technologie liegt, sowohl auf der Material- als auch auf der Systemebene. Zukünftige Technologiekonzepte spielen derzeit noch eine untergeordnete Rolle.

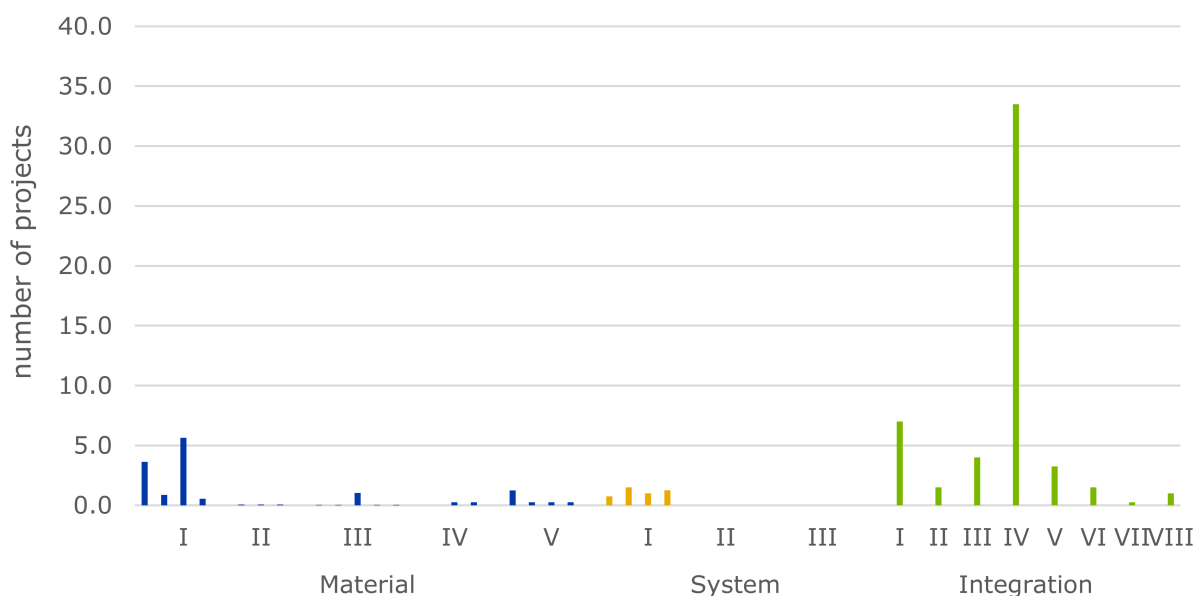


**Abb. 2-3** Verteilung der Projekte auf die Kernherausforderungen auf der Integrationsebene

Quelle: Schledde et al. (2016)

Auf der Integrationsebene (Abb. 2-3) liegt der Schwerpunkt der F&E Projekte auf dem Energiemanagement und den Kontrollmechanismen, die vor allem Strategien zur Integration erneuerbarer Energien beinhalten. Hier stehen alternative Konzepte wie second-life und hybride Systeme nicht im Fokus der derzeitigen F&E Projekte.

Eine Gegenüberstellung aller drei Ebenen in Abb. 2-4 zeigt ein deutliches Ungleichgewicht in Bezug auf die behandelten Ebenen. Hierbei widmen sich ein Großteil der Projekte der Integration elektrochemischer Energiespeicher, nur ein geringer Teil der Materialentwicklung und -verbesserung und ein verschwindend geringer Teil der Systemebene und dem damit verbundenen Batteriemangement und der Sicherheit von Energiespeichern.



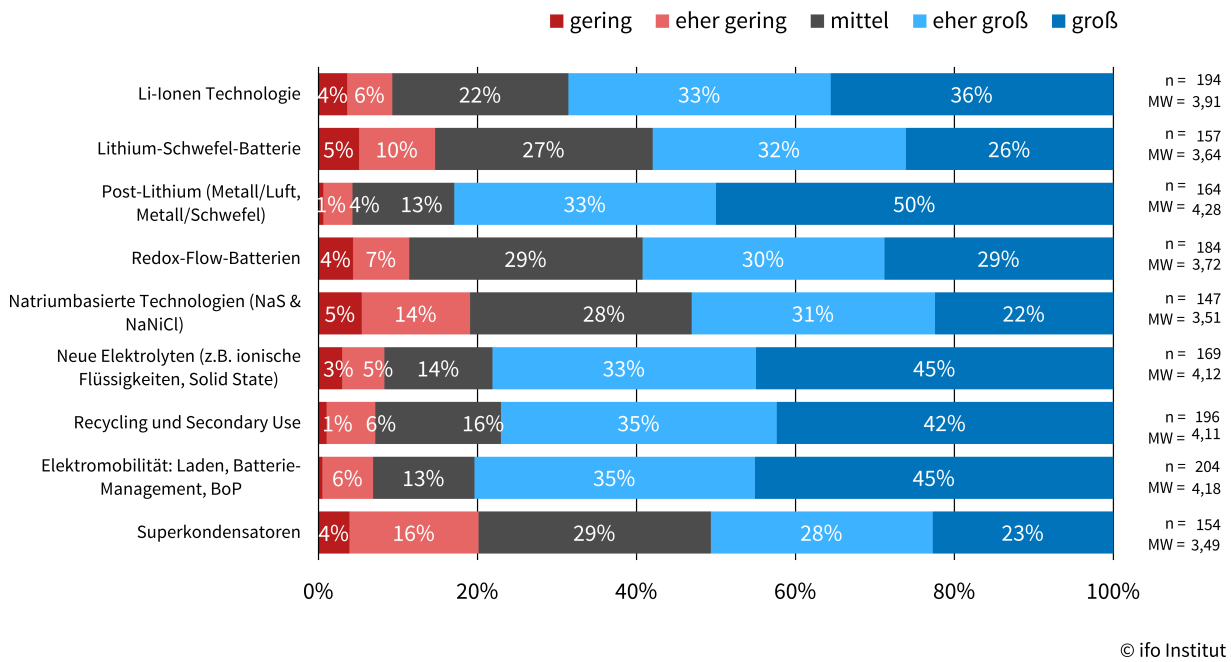
<u>Material</u>	<u>System</u>	<u>Integration</u>
I: Metal-Ion	I: Metal-ion	I: G2V
II: Metal/sulfur	II: Molten salt	II: V2G
III: Metal/air	III: Redox-flow	III: ICT
IV: Molten salt		IV: energy management and control
V: Redox-flow		V: hybrid systems
		VI: WASA
		VII: second-life
		VIII: market and business models

**Abb. 2-4 Verteilung der Projekte auf die Kernherausforderungen auf allen drei Ebenen**

Quelle: Schledde et al. (2016)

Ein ähnliches Bild gibt auch die im Rahmen des TF\_Energiewende-Projektes durchgeführte Onlineumfrage wieder. Das höchste zukünftige Marktpotenzial wird der Lithium-Ionen Technologie zugeschrieben. Erst hiernach werden neue Technologien wie post-Lithium, Li/S, Redox-flow und Na-basierte Batterien genannt. Ein besonders hohes Marktpotenzial wird den Bereichen Recycling, neue Elektrolyte, second-life Anwendungen sowie dem Batteriemangement zugeschrieben (Ifo et al. 2017).

Der Forschungsbedarf deckt sich überwiegend mit dem Marktpotenzial, jedoch verlagert sich hier der Schwerpunkt von der Lithium-Ionen Technologie zu post-Lithium-Ionen Technologien (Abb. 2-5). Auch hier sieht man einen hohen Forschungsbedarf in dem noch größtenteils unerschlossenen Thema Recycling, der Erforschung neuer Elektrolyte auf der Materialebene, dem Batteriemangement auf der Systemebene und second-life Konzepten auf der Integrationsebene.



© ifo Institut

**Abb. 2-5 Onlineumfrage zum Forschungsbedarf nach Technologien**

Quelle: Ifo et al. 2017

## 3 Relevanz öffentlicher Förderung

### 3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Bei der Bewertung der Länge der Vorlaufzeiten, d. h. der Dauer bis zur Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage für ein Technologiefeld in Deutschland, werden die folgenden im Fokus der Forschung und Entwicklung stehenden Technologien untersucht:

- Redox-flow Technologie
- Na-basierte Technologie
- Lithium/Schwefel Technologie
- Lithium/Luft und post-Lithium-Ionen Technologien

Die Lithium-Ionen Technologie wird bei der Bewertung der Vorlaufzeit ausgenommen, da es sich hierbei bereits um eine auf dem kommerziellen Markt etablierte und weit verbreitete Technologie handelt. Hierbei sei jedoch darauf hingewiesen, dass auch bei der Lithium-Ionen Technologie nach wie vor ein hohes Potenzial in Bezug auf Materialoptimierung und Systementwicklung besteht.

Die Maturität der Redox-flow Technologie wurde bereits im Rahmen einer Vielzahl von F&E Projekten demonstriert. Beispiele hierfür sind:

Deutschland:

- Project brine4power: EWE Gasspeicher: Redox-flow, 720 MWh;  
<https://www.ewe-gasspeicher.de/en/home/b4p>
- Hybrid energy storage system Braderup: Energiespeicher Nord GmbH & Co. KG; Kombination von Lithium-Ionen und Vanadium Redox-flow, insgesamt 3 MWh;  
<http://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/braderup-energy-storage-facility-comes-on-stream-42673.html>

China:

- National Wind and Solar Energy Storage and Transmission Demonstration Project: Kombination von Lithium-Ionen, Na/S und Redox-flow, insgesamt 71 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/155>

USA:

- Primus Power Modesto Wind Firming Energy Farm: Redox-flow, 112 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/9>
- Painesville Municipal Power Vanadium Redox Battery Demonstration: Vanadium Redox-flow, 8,64 MWh; <https://www.energystorageexchange.org/projects/27>
- Prudent Energy VRB-ESS - Gills Onions, California: Redox-flow, 3,6 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/2>

Dies deutet darauf hin, dass die Vorlaufzeiten der Redox-flow Technologien bis zur Kommerzialisierung als eher gering eingestuft werden können. Nichtsdestotrotz besteht nach wie vor ein großer Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Separatoren und neuer Zellchemien, z. B. Hybrid-Systeme und organische Redox-flow Batterien, um die Kosten insbesondere für die sehr teuren Ionen-Austauschmembranen sowie die Aktivmaterialien zu reduzieren.

**Tab. 3-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der Redox-flow Technologie**

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

bis 2020  bis 2030  bis 2040  bis 2050  nach 2050

Ähnlich verhält es sich im Fall der Na-basierten Technologien. Auch wenn sich diese Technologien innerhalb Deutschlands noch eines geringen Interesses erfreuen, werden Na-basierte Batterien vor allem in den USA vorangetrieben und ihre Verfügbarkeit für den kommerziellen Einsatz in Großprojekten (und diversen kleineren) demonstriert:

USA:

- Yerba Buena Battery Energy Storage System Pilot Project: Na/S, 28 MWh;  
<https://cleantechnica.com/2015/10/15/yerba-buena-4-mw-28-mwh-energy-storage-project-recognized-innovative/>
- Milton NaS Battery Energy Storage System: Na/S, 12 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/268>
- Churubusco NaS Battery Energy Storage System: Na/S, 12 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/269>
- Bluffton NaS Energy Storage System: Na/S, 12 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/271>
- PG&E Vaca Battery Energy Storage Pilot Project: Na/S, 14 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/190>
- Wind-to-Battery MinnWind Project: Na/S, 7 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/39>
- Charleston Energy Storage Project: Na/S, 7,2 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/182>

Kanada:

- WEICAN Durathon Battery Project: Na/NiCl, 2 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/1299>
- BC Hydro Battery Energy Storage Project: Na/S, 6,5 MWh;  
<https://www.energystorageexchange.org/projects/532>

China:

- National Wind and Solar Energy Storage and Transmission Demonstration Project (siehe oben)

**Tab. 3-2 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der Na-basierten Technologien**

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

bis 2020  bis 2030  bis 2040  bis 2050  nach 2050

Die Lithium/Schwefel Technologie findet bereits in einigen wenigen Feldern Anwendung, ist aber nach wie vor eine Nischentechnologie. Die fehlende Zyklenstabilität

und die noch geringe Energiedichte verhindern derzeit einen breiten kommerziellen Einsatz (Dr. H. Altheus, Fraunhofer IWS in Bloch 2014). Um eine konkurrenz- und marktfähige Technologie zu etablieren, ist bei der Lithium/Schwefel Technologie noch ein hoher Forschungsbedarf im Bereich der degradierenden Mechanismen auf Zellebene notwendig (insbesondere Degradation des Elektrolyten an der Anode, Verlust des Aktivmaterials und Shuttle-Effekt, Bruce et al. 2011, Fang und Peng 2015, Yin et al. 2016).

**Tab. 3-3 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der Li/Schwefel Technologie**

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

bis 2020  bis 2030  bis 2040  bis 2050  nach 2050

Lithium/Luft und post-Lithium-Ionen Technologien weisen die längsten Vorlaufzeiten bis zur Inbetriebnahme kommerziell verfügbarer Zellen/ Systemen auf. Diese Technologien befinden sich teilweise noch im Status der Grundlagenforschung. In Bezug auf diverse Komponenten der Zellen werden Fragen nach der grundlegenden Funktionalität, Realisierbarkeit und Reversibilität der elektrochemischen Vorgänge untersucht.

Eine ausreichende Reversibilität und Zyklenzahl sowie eine entsprechend hohe Energiedichte, die mit bereits verfügbaren elektrochemischen Energiespeichern konkurrieren kann, ist derzeit nicht gegeben.

**Tab. 3-4 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der Li/Luft und post-Lithium-Ionen Technologien**

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

bis 2020  bis 2030  bis 2040  bis 2050  nach 2050

## 3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

### Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium

Das Technology Readiness Level (TRL) des gesamten Technologiefeldes ist sehr heterogen. Insgesamt kann für das Technologiefeld ein TRL von 9 angegeben werden, da eine Vielzahl kommerzieller Systeme am Markt existieren (insbesondere Lithium-Ionen). Für das Technologiecluster T1 (Lithium-Ionen, NaS, NaNiCl, VRFB) existieren bereits nachweislich kommerzielle Systeme und Produkte am internationalen Markt. Im Technologiecluster T2 (Li/S) existieren zwar bereits erste kommerzielle Zellhersteller, jedoch erfolgten auf Systemebene überwiegend Demonstrationen und Prototypentests. Es wird also TRL 7 erreicht. Die grundsätzliche Funktionsfähigkeit von Li/Luft Systemen im Technologiecluster T3 konnte im Labor gezeigt werden, jedoch fand noch keine Demonstration als solches statt, die Technologie befindet sich also in TRL 4.

**Tab. 3-5 Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes elektrochemische Speicher**

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	TF	T1	T2	T3
Grundlagenforschung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Demonstration		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TRL= Technology Readiness Level, TF = Technologiefeld

T1 = Technologiecluster Nr. 1 (Lithium-Ionen, NaS, NaNiCl, VRFB), T2 = Technologiecluster Nr. 2 (Li/S), T3 = Technologiecluster Nr. 3 (Li/Luft)

**Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko****Bewertung Lithium-Ionen Batterien****Tab. 3-6 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (Lithium-Ionen)**

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Risiken Materialebene

Zur Verbesserung der Energiedichte werden in naher Zukunft Kohleverbundwerkstoffe oder Legierungen eingesetzt. Aktuelle Hürden auf dem Gebiet der C-Si-Anoden sind strukturelle Instabilitäten während der ersten Zyklen und die temperaturinduzierte Volumenexpansion und Oberflächen- und Grenzflächenphänomene, die gelöst werden müssen, um ihre spezifische Kapazität zu erhöhen. Die verschiedenen Kathodenmaterialien sehen sich unterschiedlichen Herausforderungen gegenüber. Das vielversprechendste Schichtoxid ist die Nickel-Mangan-Cobalt (NMC)-Technologie. Allerdings ist es sinnvoll den Kobaltanteil zu reduzieren, um die Kosteneffizienz zu verbessern. Um diese nickelreichen Materialien zu realisieren, muss die Nickelstörung (Nickel anstelle von Lithium in der Lithiumposition) adressiert werden. Die Lithium-Mangan-Oxid- (LMO)-Spinell-Kathode hingegen ist durch ihre geringe Spannungslage unter Evolutionsdruck. Ein möglicher Weg, um dieses Problem zu überwinden, ist die Entwicklung von Hochspannungsspinellen unter der Verwendung von Chrom, Kobalt, Eisen und Kupfer. Nanostrukturierte Spinelle werden derzeit untersucht, um die Leistungsfähigkeit der LMO-Spinell-Kathoden weiter zu verbessern. Ein kritischer Parameter ist in diesem Fall die höhere Löslichkeit von Mangan (Strukturschaden). Eine weitere Kathodenart basiert auf Lithium-Eisen (Ferrum) - Phosphat (LFP). Diese Kathoden leiden unter vergleichsweise geringer elektrischer und ionischer Leitfähigkeit. Insbesondere ist die geringe elektrische Leitfähigkeit derzeit einer der Schwerpunkte bei der Erforschung von LFP-Werkstoffen und wird derzeit über eine mögliche Kohlenstoffbeschichtung von LFP-Partikeln adressiert.

Die elektrochemische Stabilität des Elektrolyten ist die schwierigste Hürde für die Realisierung eines Hochspannungssystems. Derzeit sind Elektrolyte stabil bis 4,3 V gegen Lithium. Die obere Spannungsgrenze muss erhöht werden, wenn eine höhere Energie- und Leistungsdichte angestrebt wird. Weiterhin werden neue Verbundwerkstoffe von leitfähigen Salzen untersucht, die eine verbesserte Hochspannungstabilität und eine verminderte Auflösung der Kathode und des Anodenmaterials ermöglichen (Korthauer 2013).

## Risiken Systemebene

Unter den hier dargestellten elektrochemischen Speichern stellt die Lithium-Ionen Technologie die am weitesten entwickelte Technologie dar. Einhergehend damit wird auch die Systemebene dieses Speichers in den Fokus der Wissenschaft verlagert. Hierbei stehen das thermische Management und die Erforschung neuer Heiz- und Kühlkonzepte (z. B. Phase-Change-Materials – PCM) im Vordergrund, um die Lithium-Ionen Batterie im sicheren Temperaturbereich zu betreiben und gleichzeitig eine lange Haltbarkeit zu garantieren, sowie das elektrische Management in Form von Algorithmen- und Softwareentwicklung zur Zustandsbestimmung und zur Ausbalancierung der Einzelzellen des Systems.

Mit zunehmender Maturität der Systemebene gewinnen eine die Genauigkeit der Zustandsbestimmung des Batteriesystems (z. B. für eine Reichweitenprognose in der Elektromobilität, aber auch die Sicherheit und Haltbarkeit der Systeme), Alterungsphänomene und -prognosen in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen und Recycling



zunehmend an Bedeutung (Alotto et al. 2014, Bandhauer et al. 2011, Hueso et al. 2013, Saw et al. 2016).

### Bewertung NaS und NaNiCl

**Tab. 3-7 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (NaS)**

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Tab. 3-8 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (NaNiCl)**

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Risiken Materialebene

Um ihr Potenzial einer sehr niedrigen Entladungsrate, einer hohen Zykluszahl und einer langen Lebensdauer und einer relativ einfachen Fertigung voll auszuschöpfen, müssen insbesondere Tieftemperatur-Materialien entwickelt werden. Das kostengünstige und hochverfügbare aktive Material, insbesondere im Vergleich zu Lithium, macht die geschmolzene Salzbatte zu einem vielversprechenden Kandidaten für eine langfristige Technologie in der stationären Energiespeicherung (Hueso et al. 2013).

Die Anode des Natrium-Schwefelsystems trägt die Gefahr des Natrium-dendritischen Wachstums und damit der Zerstörung der Zelle. Die Natrium-Nickel-Chlorid-Batterie umgeht das Problem durch die Verwendung von reinem Natrium in flüssiger Form (Hueso et al. 2013).

Im Falle der Natrium-Schwefel-Technologie wird  $\beta$ -Aluminiumoxid als Festelektrolyt (BASE) verwendet, der gleichzeitig als Separator für beide Elektroden dient. In der Natrium-Nickel-Chlorid-Batterie dient geschmolzenes  $\text{NaAlCl}_4$  als Elektrolyt.  $\text{NaAlCl}_4$  erfordert eine hohe Temperatur in seiner flüssigen Form und das  $\beta$ -Aluminiumoxid verlangt hohe Temperaturen, um eine ausreichend hohe Natriumionenleitfähigkeit in der Festphase zu gewährleisten. Abgesehen von den anspruchsvollen thermischen Bedingungen ist die dünne und zerbrechliche  $\beta$ -Aluminiumoxid-

Keramik anfällig für Brüche und Risse, die zu einem unerwünschten Kontakt und einer unkontrollierten Reaktion zwischen geschmolzenem Natrium und geschmolzenem Schwefel führen können. Um eine Niedertemperatur-Schmelzsalzbatterie (<200 °C) zu erreichen, müssen neue Elektrolyt- und Separatormaterialien gefunden werden, die eine hohe Ionenleitfähigkeit, thermodynamische Stabilität, chemische Verträglichkeit und einen guten Kontakt zwischen beiden Elektroden in einem festen Zustand bieten. Verschiedene Kandidaten werden derzeit untersucht, wie Glaskeramiken und der vielversprechende NASICON, welcher mit Betriebstemperaturen von 90°C benötigt und somit alle Komponenten in der festen Phase bleiben (Hueso et al. 2013).

### Risiken Systemebene

Die größte Herausforderung der Na-basierten Batterien auf der Systemebene ist die erforderliche, hohe Temperatur des geschmolzenen Salzes. Hierbei stellen hohe Temperaturen kein Sicherheitsrisiko dar, sondern sind sogar Voraussetzung für die Funktionsweise, d. h. eine gute thermische Isolierung und Minimierung der thermischen Verluste (z. B. durch Volumenvergrößerung) muss gewährleistet sein. Des Weiteren benötigt das System auch bei Nichtbenutzung ein zusätzliches Heizsystem, um den flüssigen Zustand des Salzes zu erhalten, und stellt damit eine zusätzliche Komponente dar, die zur Komplexität des Systems beiträgt.

Neben dem thermischen Management stellen die hohen Temperaturen und das geschmolzene Salz eine weitere Herausforderung in Bezug auf Korrosion der Materialien dar. Für die Na-basierten Technologien ist die Entwicklung von widerstandsfähigen jedoch gleichzeitig kostengünstigen Materialien für Gehäuse, Dichtungen, etc. ein weiteres abzudeckendes F&E Feld (Arora et al. 2016, Hueso et al. 2013, Saw et al. 2016).

### Bewertung Redox-flow

**Tab. 3-9 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (VRFB)**

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Risiken Materialebene

Eine Eigenschaft des Redox-flow-Systems ist deren langsame Kinetik in beiden Elektroden. Infolgedessen sind eine große aktive Oberfläche und / oder Katalysatoren notwendig, um die trägen Reaktionen zu kompensieren. Dies wird durch hochporöse Elektroden (poröse Kohlenstoffe, aber auch Metallschäume und Maschen) realisiert, um die aktive Oberfläche zu maximieren. Auf der anderen Seite müssen sehr gewundene Strukturen vermieden werden, da sie die Durchlässigkeit reduzieren und

im Widerspruch zu der Minimierung von Druckabfall und Pumpkosten stehen. Eine weitere Anforderung an die Elektrodenkonstruktion ist eine gleichmäßige Porengrößenverteilung, um tote Zonen und einen erhöhten ohmschen Widerstand aufgrund der stark diffusionsbeschränkten und damit nicht genutzten Mikrostrukturen zu vermeiden. Weitere Gründe für die unvollständige Nutzung der aktiven Flächen und der Masse- / Ladungstransportbeschränkungen sind Gaseinschlüsse ( $H_2$  und  $O_2$ ) an der Elektrodenoberfläche und Niederschlag von Reaktanten welche in der Elektrode zum einen zersetzt und Porenverstopfung hervorruft. Bei höheren Stromdichten dominieren Transportverluste durch die dramatische Verarmung an aktiver Spezies, die ganze Abschnitte der Elektroden wirkungslos werden lassen. Darüber hinaus führt eine ungleichmäßige Permeabilität auf der Stapelebene sowie großräumige Heterogenitäten, die durch Montagetoleranzen oder ungleichmäßige thermische Ausdehnung verursacht werden, zu einer Umgehung von großen Abschnitten der Elektroden und / oder Zellen. Im Falle von Hybrid-Redox-flow-Batterien, die aus einer Galvanisiermetallelektrode bestehen, werden poröse Elektroden aufgrund von Porenverstopfung umgangen. Auf diese Weise ist nur eine kleine aktive Fläche verfügbar und Ionendiffusionsabstände werden erhöht (Alotto et al. 2014, Weber et al. 2011).

Die meisten der Redox-flow-Batterietypen basieren auf wässrigen Elektrolyten. Die geringe elektrochemische Stabilität von Wasser erfordert ein niedriges Leerlaufpotential, um die Bildung von  $H_2$  und  $O_2$  zu verhindern. Weiterhin führt das Strömungsprinzip zu großen transversalen Gradienten der elektrolytischen Lösung zu den Stellen der Elektrode und damit zu einer reduzierten Stromdichte und parasitären Reaktionen wie Gasentwicklung und Elektrodenabbau in den verarmten Bereichen. Dennoch sollte eine maximale Verwendung der Reaktanten und Onkel angestrebt werden, um die eingesetzte und gespeicherte Energie zu effizient zu nutzen. Der Massentransport und die Stromdichte und damit die Energiedichte sind durch die Konzentrationen der aktiven Spezies beschränkt. Das heißt die Energiedichte wird durch die am wenigsten lösliche Spezies bestimmt. Eine unzureichende Versorgung führt zu einer erhöhten Konzentrations- und/oder Pumpkraft. Die Löslichkeit kann durch Temperaturregelung erhöht werden, andererseits muss der temperaturabhängige Niederschlag der Lösung vermieden werden. Aufgrund der Leitfähigkeit des ionenhaltigen Elektrolyten treten in der elektrolytischen Phase Bypassströme (Shuntströme) auf, die in einem signifikanten Leistungsverlust und Spannungsabfall resultieren. Darüber hinaus macht die ionische Natur der elektrolytischen Lösung das Redox-flow-System hochgradig korrosiv für Dichtungen, Pumpen und weitere Gehäuseteile und beschränkt die Wahl der Materialauswahl und erhöht ihre Kosten (Alotto et al. 2014, Weber et al. 2011).

Die Ionenaustauschmembran zwischen Anolyt und Katholyt ist die Schlüsselkomponente im Redox-flow-System. Die erfolgreichste Nafion®-Membran hat noch enorme Kosten, einen hohen aktiven Ionenübergang und eine niedrige Ionenselektivität.

Die Membran muss mehrere teilweise entgegengesetzte Forderungen erfüllen. Es muss eine hohe Leitfähigkeit und Permeabilität zur Verbesserung des Ladungstransports und zur Verringerung der ohmschen Verluste, die die dominierende Zellresistenz sind, eine hohe Selektivität zur Vermeidung von unerwünschtem Ionenübergang und damit reduzierter Effizienz oder entgegengesetzter Halbzellenvergiftung und chemischer Stabilität gegenüber allen beteiligten Spezies liefern können. Darüber

hinaus kann eine erhöhte Selektivität den leitungsverringern Transport von Spezies verringern. Diese bereits anspruchsvollen Anforderungen müssen zu geringen Kosten realisiert werden.

### Risiken Systemebene

Auf der Systemebene steht die Redox-flow Technologie vor ganz neuen Herausforderungen. Im Gegensatz zu anderen elektrochemischen Energiespeichern ist hierbei die erhebliche Größe der Elektrolyttanks und des zusätzlichen Pumpsystems zu nennen.

Eine optimale Flussrate sowie eine gleichmäßige Versorgung der porösen Elektrode mit aktiven Spezies stellen die größten Herausforderungen in der Realisierung großer Redox-flow Systeme dar (Alotto et al. 2014, Arora et al. 2016, Hueso et al., Saw et al. 2016, Weber et al. 2011).

### Bewertung Li/Schwefel

**Tab. 3-10 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (Li/S)**

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

### Risiken Materialebene

Systeme, die auf metallischem Lithium basieren, haben das intrinsische Risiko von Kurzschlüssen aufgrund des Wachstums von Dendriten, eine geringe Flexibilität und chemische Stabilität der Polysulfide (Korrosion und Polarisation der Anode) und sowie eine geringe Stabilität des Elektrolyten (Bildung einer instabilen Solid Electrolyte Interphase (SEI)) und zeigen zudem große Volumen- und Oberflächenveränderungen. Darüber hinaus bewirkt die hohe Reaktivität von metallischem Lithium ein verstärktes SEI-Wachstum und die Abscheidung von unlöslichem  $\text{Li}_2\text{S}$  und  $\text{Li}_2\text{S}_2$  auf der Anode. Die anspruchsvolle Aufgabe, die Chemie und die Morphologie des SEI zu kontrollieren, sowie die Stabilität der Anode zu gewährleisten wird derzeit über lithiierten Kohlenstoff und Lithiumlegierungen untersucht (Bruce et al. 2011, Fang und Peng 2015, Yin et al. 2016).

Eine schlechte Wiederaufladbarkeit und eine begrenzte Ladungsaufnahme aufgrund des isolierenden und festen  $\text{Li}_2\text{S}$  und Schwefel sind die Hauptprobleme auf der Kathodenseite. Die Begrenzung der Leistungsfähigkeit macht eine hochleitende Kathodenmatrix erforderlich (z. B. elektroaktive Polymere und Kohlenstoffe). Wenn während des Shuttle-Effekts unlösliche  $\text{Li}_2\text{S}_2$  und/oder  $\text{Li}_2\text{S}$  entstehen, wird das Entladeprodukt auf der Anode und im Separator abgeschieden, was zu einem Verlust an Konnektivität und einem irreversiblen Verlust an aktivem Material führt. Hohe Volumen- und Morphologieänderungen aufgrund von Auflösung und Abscheidung von Schwefel und daraus resultierenden Konnektivitätsverlusten erfordern eine hochlei-

tende Matrix mit großer Oberfläche und Flexibilität, eine hohe Schwefelaffinität (Dotierten Kohlenstoff) und eine Kern-Schale-Struktur, um Volumenänderungen zu verhindern und als Schwefel-Wirt zu dienen (Bruce et al. 2011, Fang und Peng 2015, Yin et al. 2016).

Aktuelle Elektrolyte der Lithium-Schwefel-Batterie sind giftig, entflammbar und besitzen keine chemische Stabilität. Es wurde gezeigt, dass die Schwefelreduktionsstufen mit Carbonat-basierten Elektrolyten reagieren. Während Äther-basierte Elektrolyte aufgrund einer höheren Löslichkeit für Poly-Sulfide eine gute Schwefel-ausnutzung bieten, reagieren sie mit metallischem Lithium zu einem instabilen SEI. Daher sind neue Elektrolytkonzepte oder Mischungen von Lösungsmitteln, Additiven (z. B.  $\text{LiNO}_3$  und Kupferacetat) und hohe Salzkonzentrationen notwendig, die eine stabile und flexible SEI bilden und den Shuttle-Effekt verhindern.

Zukünftige und all-solid-state-Lösungen sind Forschungsgegenstand und verringern potenziell den Shuttle-Effekt und erhöhen die Beständigkeit der Schwefel-Elektrolyt-Grenzfläche, jedoch prägt diese Technologie eine niedrigere Ionenleitfähigkeit aus (Bruce et al. 2011, Fang und Peng 2015, Yin et al. 2016).

### Risiken Systemebene

Die Lithium/Schwefel Technologie befindet sich auf der Materialebene auf einem teilweise noch grundlegenden Niveau der Forschung. Trotz bereits erster funktionierender Systeme sind die Degradationsphänomene ein limitierendes und noch zu lösendes Problem. Diese finden auf Zellebene statt, so dass Komplettsysteme (noch) nicht im Fokus der Forschung stehen. Es ist jedoch anzunehmen, dass für Lithium/Schwefel Batterien ähnliche Herausforderungen auf der Systemebene bereitstehen wie bereits bei der Lithium-Ionen Technologie.

### Bewertung Li/Luft

**Tab. 3-11 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld elektrochemische Speicher (Li/Luft)**

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

### Risiken Materialebene

Metallische Lithium-basierte Batterien tragen das Risiko von Kurzschlüssen als Folge des dendritischen Wachstums. Fraktionen, Verlust der Leitfähigkeit und Verdickung des SEI können durch grobe (Re-) Bildung von Lithium- und Großvolumenänderungen verursacht werden. Darüber hinaus ist es schwierig, die Chemie und die Morphologie des SEI aufgrund der hohen Reaktivität von metallischem Lithium zu kontrollieren. Die SEI muss leitfähig für Lithium-Ionen und flexibel für Volumenänderungen sein, aber das dendritische Wachstum verhindern.

Wässrige Systeme erfordern aufgrund der hohen Reaktivität mit Wasser eine stabile Lithiumschuttschicht. Jedoch erhöhen große Dicken der Wasserschuttschicht den Widerstand, während dünne Schichten schwer herzustellen sind. Daher werden Hybridsysteme aus wässrigen und nicht-wässrigen Elektrolyten untersucht. Darüber hinaus blockiert das ausgefällte Entladungsprodukt die Lithium-Anoden-Schuttschicht (Bruce et al. 2011, Christensen et al. 2012, Rahman et al. 2013).

Bifunktionelle Katalysatoren oder ein Drei-Elektroden-Design (Anode und zwei Kathoden für Ladung und Entladung) sind erforderlich, um die Kinetik während der Ladung und Entladung zu verbessern. Bei wässrigen Systemen ist die Notwendigkeit geeigneter Katalysatoren aufgrund der kinetisch langsameren Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR) und der Sauerstoffentwicklungsreaktion (OER) noch dringender. Allerdings sind die derzeit untersuchten Katalysatoren teuer, (elektro-) chemisch instabil und ihre Funktionalität noch nicht vollständig verstanden. Nicht-wässrige Systeme erfordern eine große aktive Oberfläche für die elektrochemischen Reaktionen und damit eine hochporöse Kathodenstruktur. Eine Verstopfung der porösen Struktur erfolgt auf Grund der Unlöslichkeit von  $\text{Li}_2\text{O}_2$ . Porenverstopfung bewirkt eine Reduktion der  $\text{O}_2$ -Transportkapazitäten und reduziert die aktive Oberfläche und die Kapazität aufgrund des unbenutzten Kathodenvolumens. Weiterhin erhöht die Passivierung der Elektrodenoberfläche als Folge von Nebenreaktionsprodukten und der isolierende Charakter von  $\text{Li}_2\text{O}_2$  die Impedanz und das Überpotenzial zwischen dem ORR und dem OER. So muss eine Optimierung der Elektrodengestaltung über Geometrievariation, Benetzbarkeit der porösen Struktur und Gaskanäle zur Erhöhung des  $\text{O}_2$ -Transports vorgenommen werden. Um die Entladungsproduktverteilung zu kontrollieren, müssen Wachstumsmechanismen und der Einfluss von Defekten und Morphologie des Entladungsproduktes geklärt werden.

Wässrige Systeme erfordern eine Membran, die  $\text{Li}^+$  blockiert und  $\text{OH}^-$  durchlässt. Darüber hinaus muss die Frage eines möglichen Kontaktbruchs mit der Elektrode durch Entladungsprodukte geklärt werden, um eine vollständige Wiederaufladbarkeit der Zelle zu gewährleisten (Cho et al. 2015, Bruce et al. 2011).

Wässrige Systeme leiden unter zwei Hauptproblemen, nämlich der Verdampfung des wässrigen Elektrolyten (was eine begrenzte Reversibilität bewirkt) und die reduzierte spezifische Energie, da die verlorene Masse an  $\text{H}_2\text{O}$  den Energiegehalt negativ beeinflusst. In Gegensatz dazu weist ein nicht-wässriges System eine geringe Diffusivität und Löslichkeit von  $\text{O}_2$  auf. Es wurde bisher kein stabiles Lösungsmittel für einen effizienten reversiblen Prozess gefunden. Während sich Carbonat-basierte Elektrolyte bei der Entladung auflösen, zeigen Ether-basierte und Sulfoxide Instabilitäten während des Ladevorgangs. Weitere Instabilitäten können aufgrund der Anwesenheit von Zersetzungsprodukten ( $\text{O}_2^-$  und  $\text{LiO}_2$ ) auftreten.

Darüber hinaus sind Fragen der Sicherheit bezüglich der aktuellen flüssigen und brennbaren Elektrolyte für zukünftige Festkörperlösungen (All-Solid-State-Systeme) noch unbeantwortet. Zusätzlich weisen Festkörper-Elektrolyte derzeit niedrige Lithium-Ionen-Leitfähigkeiten, hohe Kontaktwiderstände und Ablösung der festen Schichten auf. Darüber hinaus ist die Herstellung geeigneter Festkörperelektrolyte anspruchsvoll, insbesondere die chemischen Instabilitäten des metallischen Lithi-

ums in Kombination mit wässrigen Lösungen und bei hohen Potenzialen (Bruce et al. 2011, Christensen et al. 2012, Rahman et al. 2013).

### Risiken Systemebene

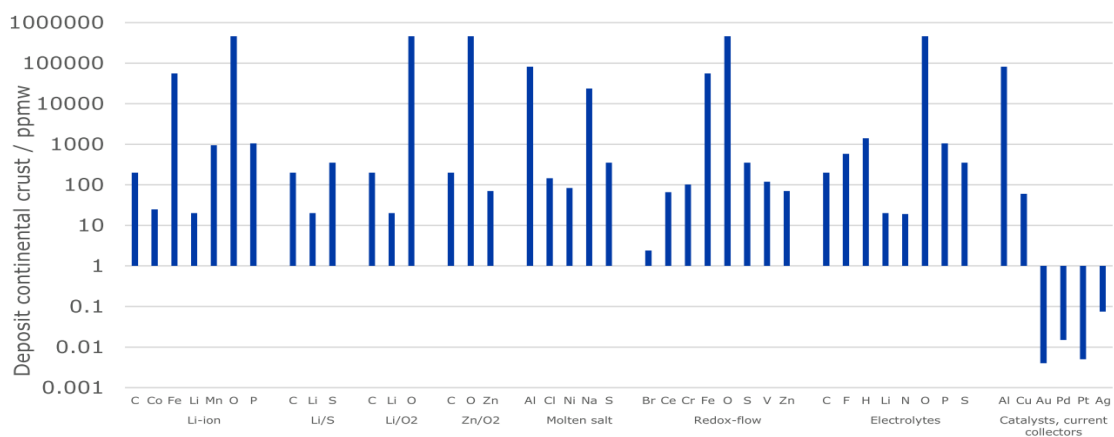
Ähnlich der Lithium/Schwefel-Technologie befindet sich die Lithium/Luft Technologie auf der Materialebene noch vollständig auf dem Niveau der Grundlagenforschung. Natürlich wurden bereits erste Abschätzung für Batteriesysteme mit Einsatz in der Elektromobilität gemacht und unterschiedliche Szenarien mit und ohne externe Sauerstofftanks durchgespielt (Christensen et al. 2012), die Systemebene steht jedoch auch hier aufgrund der noch zu lösenden Herausforderungen auf der Materialebene noch nicht im Fokus der Forschung und Entwicklung.

### Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

**Tab. 3-12 Einsatz kritischer Rohstoffe im Technologiefeld elektrochemische Speicher (Zellebene, ohne Stromrichter und Systemkomponenten, Risikogruppe 3) nach DERA Rohstoffliste**

Kritischer Rohstoff	Substitutionsmöglichkeit	Rezyklierbarkeit
Vanadium (Vn)	Nein	?
Graphit (C)	Nein	Ja
Kobalt (Co)	Nein	Ja
Mangan (Mn)	Nein	Ja
Palladium (Pd)	Ja	?

Die grundsätzliche Rezyklierbarkeit von Lithium-Ionen Batterien und der in Tab. 3-12 genannten Rohstoffe konnte z. B. im Projekt Lithorec und Lithorec 2 gezeigt werden. Für Palladium und Vanadium konnten keine Angaben hierzu ermittelt werden.



**Abb. 3-1 Wichtigste verwendete Rohstoffe in elektrochemischen Speichern nach Technologien**

Quelle: Schledde et al. (2016)

## 4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

### 4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Zukünftige Energiesysteme werden eine hohe Flexibilität bereitstellen müssen, so dass für elektrochemische Speicher in mehreren Anwendungen am elektrischen Netz hohe Marktpotenziale zu erwarten sind (siehe auch Abb. 1-1 und Abb. 1-2). Für Deutschland wurde ein Gesamtbedarf von 108 GWh in 2050 ermittelt (Fraunhofer IWES 2017), die aktuell installierte elektrochemische Speicherkapazität liegt also schätzungsweise erst bei ca. 0,5-1,5 % der in 2050 notwendigen installierten Speicherkapazität und wird heute im Wesentlichen durch PV-Heimspeicher und Primärregelleistung geprägt. Es ist also davon auszugehen, dass ein hohes weiteres zukünftiges Marktpotenzial für elektrochemische Speicher besteht.

In Deutschland ist in den vergangenen 4-5 Jahren zu beobachten, dass der Markt der elektrochemischen Speicher in Form von stationären Speichern vor allem in zwei Segmenten stark gewachsen ist. Ein Segment ist der Primärregelleistungsmarkt (Leistungsbereich MW/MWh) und ein weiteres Segment stellt die Eigenverbrauchsoptimierung in Kombination mit Fotovoltaik-Anlagen auf Hausdächern dar (PV-Heimspeicher, Leistungsbereich kW/kWh).

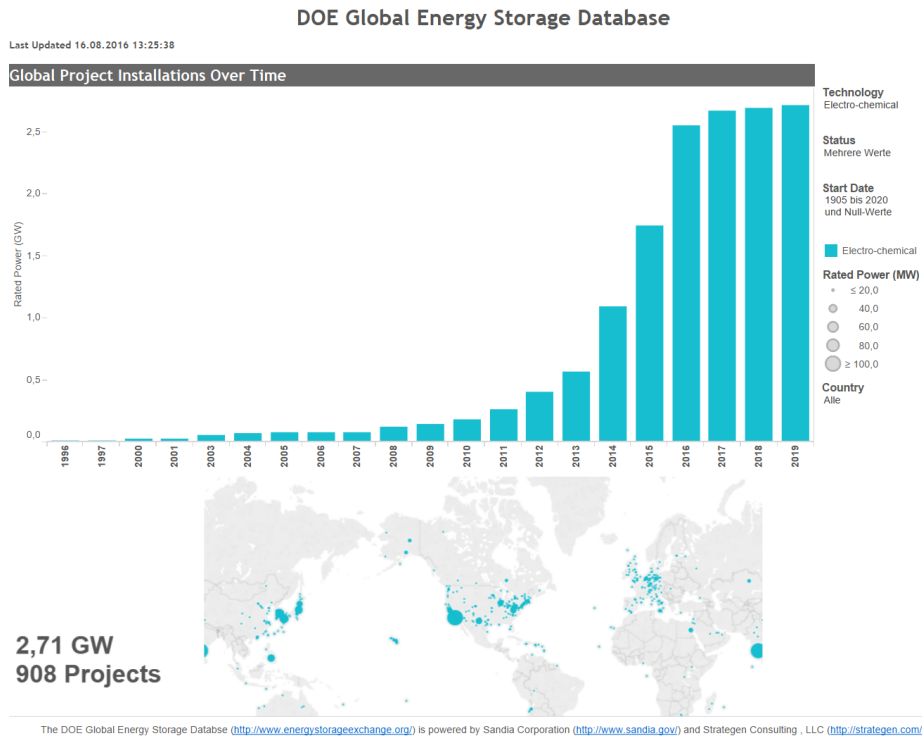
#### Primärregelleistung

Für den Einsatz in der Primärregelleistung wird z. B. von Steag eine Batterieleistung von insgesamt 90 MW (6 Systeme mit je 15 MW) installiert, wodurch 45 MW als Primärregelleistung vermarktet wird (siehe Steag, 14.10.2016). Weitere Batteriesysteme werden ebenso auf dem Primärregelleistungsmarkt vermarktet, z. B. das Batterie-Projekt von WEMAG, welches von 5 MW auf 10 MW vergrößert wird (siehe WEMAG, 05.10.2016). Auch Heimbatteriesysteme sind in der Primärregelleistung aktiv, die z. B. durch BKW vermarktet werden (siehe BKW, 17.08.2016). Der Markt für Primärregelleistung erfolgt in Kooperation mit den Ländern Belgien, Niederlande, Frankreich, Schweiz und Österreich und hat mittlerweile eine Größe von fast 1.400 MW. Die Primärregelleistung, die insgesamt in Europa (entso-e) vorgehalten wird, umfasst rund 3.000 MW. Ein größeres Batteriesystem mit einer Größenordnung von 15 MW deckt somit ca. ein halbes Prozent des aktuell gemeinsamen Markts für die wöchentliche Ausschreibung von Primärregelleistung ab.

Der Marktanteil elektrochemischer Speicher an der Primärregelleistung dürfte 2016/2017 im Bereich 160 GW liegen, dieses entspricht einem Marktanteil von 27 % (Stenzel 2015).

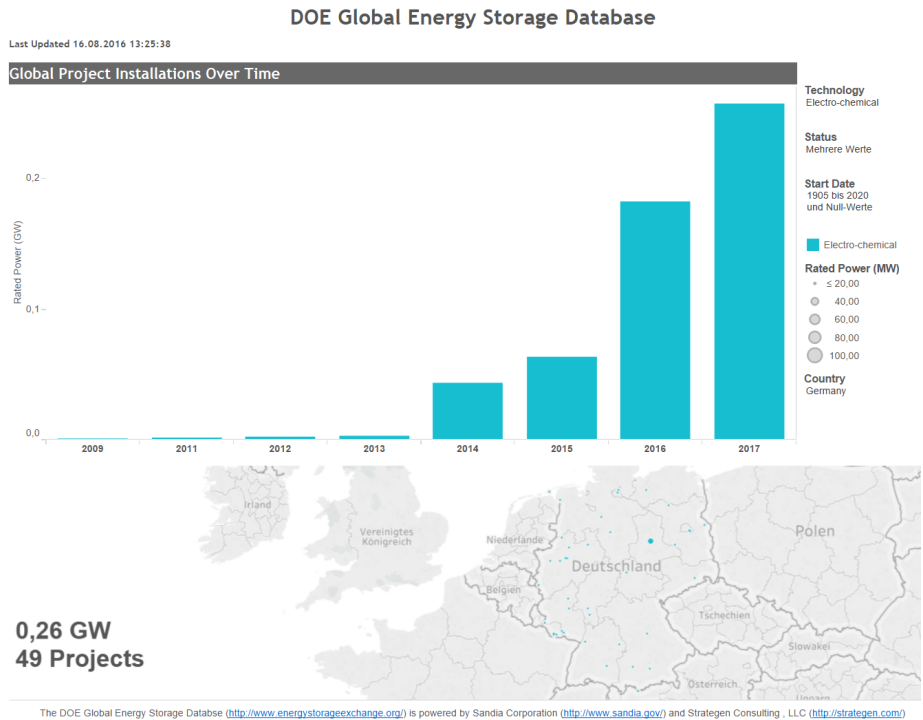
Weiterhin wird deutlich, dass der Markt der großen stationären Speichersysteme in Deutschland von Systemen für die Primärregelleistung dominiert wird. So entspricht der Anteil der Speichersysteme für Primärregelleistung rund 62 % am gesamten Markt in Deutschland (vgl. dazu Abb. 4-2 mit 260 MW).





**Abb. 4-1** Übersicht über weltweite installierte, geplante, angekündigte und in Bau befindliche große stationäre Speichersysteme/Projekte im Themenfeld elektrochemische Speicher

Quelle: DOE (2017)

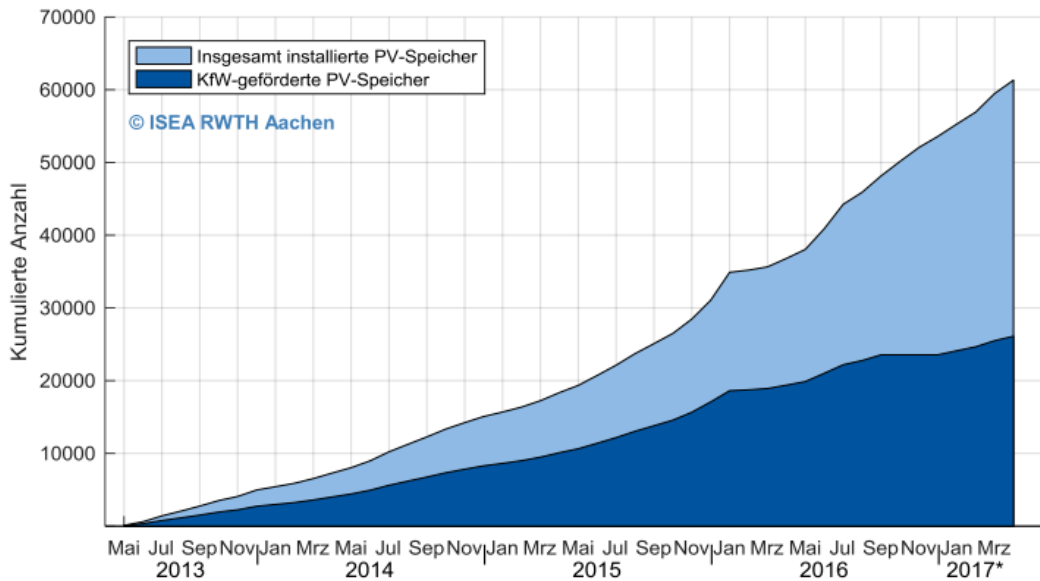


**Abb. 4-2** Übersicht über in Deutschland installierte, geplante, angekündigte und in Bau befindliche große stationäre Speichersysteme/ Projekte im Themenfeld elektrochemische Speicher

Quelle: DOE (2017)

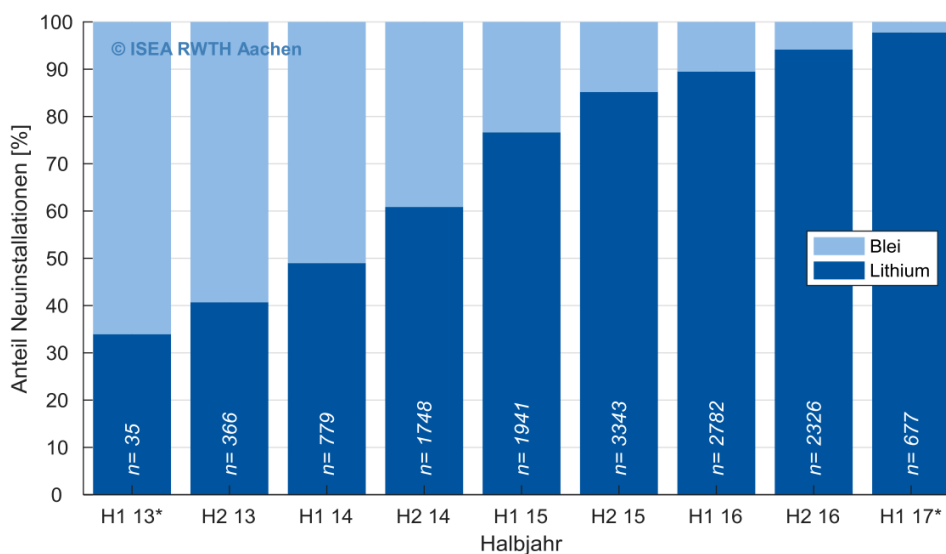
### PV-Heimspeicher

„In Deutschland wurde im Jahr 2016 fast jede zweite kleine PV-Anlage zusammen mit einem Batteriespeicher installiert. Ende April 2017 waren etwa 61.000 dezentrale Solarstrom-Speicher mit einer kumulierten nutzbaren Speicherkapazität von etwa 400 MWh an die deutschen Niederspannungsnetze angeschlossen. Die anspruchsvollen technischen Rahmenbedingungen der KfW-Förderung haben dabei einen messbar positiven Einfluss auf die gesamte Marktentwicklung entfaltet.“ (Figgener et al. 2017).



**Abb. 4-3 Kumulierte Anzahl der Installationen von PV-Speichern in Deutschland von Mai 2013 bis April 2017**

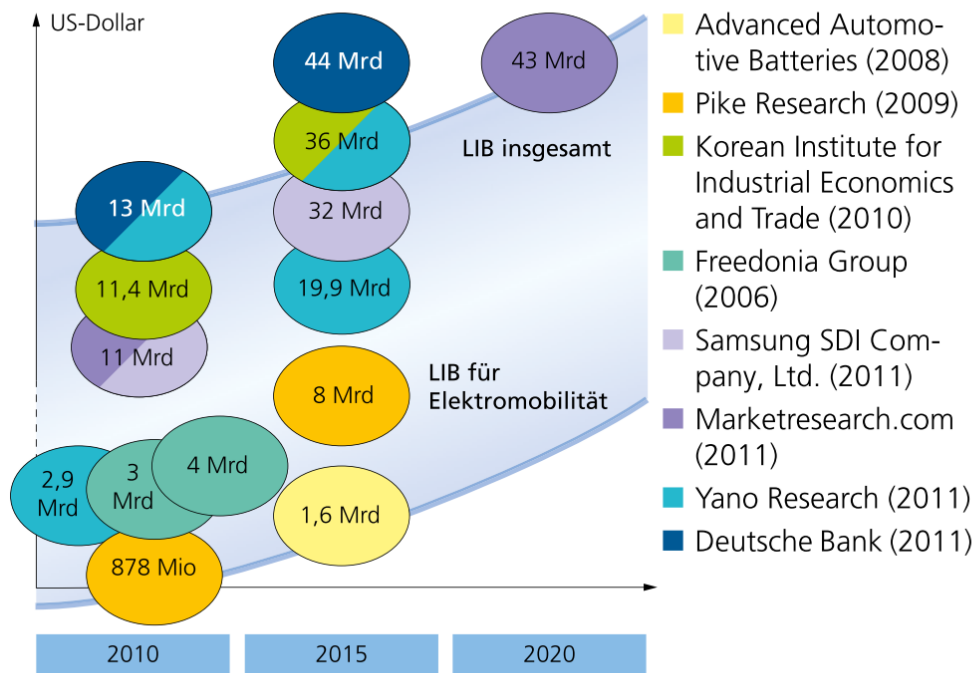
Quelle: Figgener et al. (2017)



**Abb. 4-4 Anteil der Batterietechnologien der beim Speichermonitoring registrierten PV-Speicher nach Anzahl von Mai 2013 bis April 2017**

Quelle: Figgener et al. (2017)

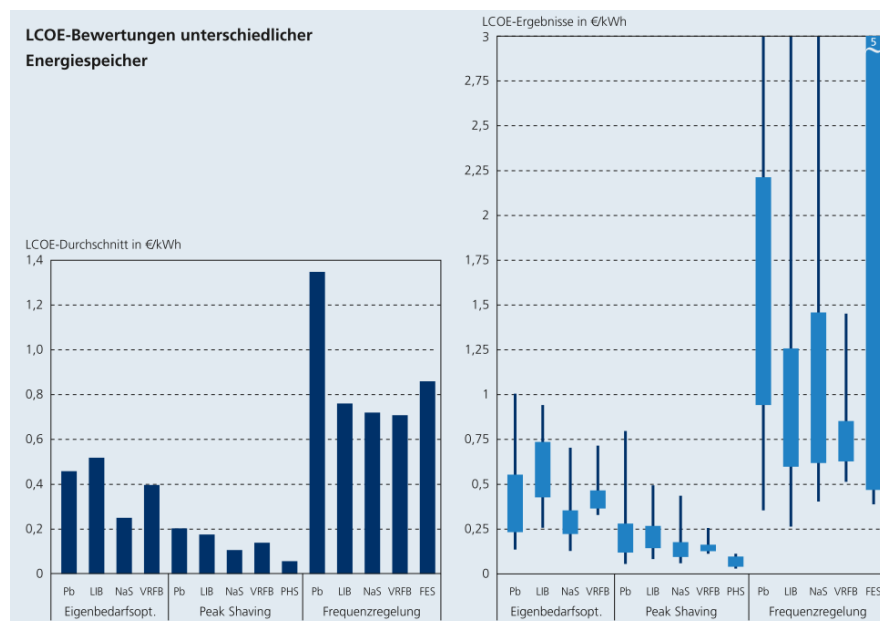
Der weltweite Markt für stationäre Lithium-Ionen Energiespeicher wird monetär voraussichtlich auf mehrere 10 Mrd. Dollar bis 2020 anwachsen (siehe Abb. 4-5).



**Abb. 4-5 Prognose für die Weltweite Marktentwicklung von Lithium-Ionen Batterien**

Quelle: Thielmann et al. (2012)

Für eine in Zukunft höhere Marktdurchdringung mit elektrochemischen Speichern sind in der jeweiligen Anwendung insbesondere die Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Electricity - LCOE) relevant. Je nach Technologie unterscheiden sich die LCOE-Kosten in der jeweiligen Anwendung (Abb. 4-6).



**Abb. 4-6 LCOE-Bewertungen unterschiedlicher Energiespeicher**

Quelle: Thielmann et al. 2015

#### **4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen**

Energiespeicher gelten allgemein als Technologien, die die Energiewende unterstützen. Ihr direkter Beitrag zu den Klimazielen und weiteren Emissionszielen ist zwar entscheidend, auf Basis der genannten Szenarien jedoch nicht direkt quantifizierbar. Ihr Beitrag zu den Klimazielen wird durch die Befähigung des elektrischen Energiesystems auch bei einer weiteren Steigerung des Anteils volatiler Erneuerbarer Energiewandler im Erzeugerportfolio sicher, zuverlässig und resilient zu funktionieren nur indirekt sichtbar. Dennoch spielen Energiespeicher daher eine entscheidende Rolle bei der Erreichung der Klimaziele, da sie den Erneuerbaren Energie-Ausbau unterstützen. Als eine mögliche Flexibilisierungsmaßnahme für das elektrische Netz wird der Beitrag der Energiespeicher zu den Klima- und Emissionszielen den erneuerbaren Energiewandlern zugeschrieben. Des Weiteren können Energiespeicher auch zur verbrauchsoptimierten Betriebsweise von fossilen Energiewandlern eingesetzt werden (Jim Eyer 2010, S. 142).

#### **4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz**

Auf die Bewertung dieses Kriteriums wurde verzichtet.

#### **4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz**

Energiespeicher konkurrieren mit anderen Flexibilisierungsmaßnahmen, wie z. B. Abregelung und Lastmanagement. Techno-Ökonomische Kenndaten, die die Kosteneffizienz bestimmen, sind in Kapitel 1.6 aufgeführt.

#### **4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung**

Mit Blick auf die Lithium-Ionen-Technologie lassen sich schon heute einige Unternehmen identifizieren, die Materialien und Teilkomponenten innerhalb Deutschlands fertigen (diese Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit).

Insbesondere für Binder gibt es in Deutschland keine Unternehmen, wenige in Europa und die meisten in Asien. Hersteller für Separatoren sind beispielsweise: Litarion, DuPONT, Freudenberg Nonwovens, LG Chem, Polypore, Degussa GmbH/Evonic und Treofan Germany. Ein deutscher Hersteller von Lithium ist beispielsweise K&S. Elektrolyten werden erforscht und entwickelt beispielsweise an der Universität in Gießen und in der Max Planck und Fraunhofer Forschungsgesellschaft und produziert von BASF, DAIKIN und IoLiTec. Kathodenmaterialien werden beispielsweise von 3M, BASF und UMICORE entwickelt, während Anoden von Phostech Lithium und SGL Carbon hergestellt werden. Diese kurze Übersicht zeigt, dass ein inländisches Wertschöpfungspotenzial in Bezug auf Lithium-Ionen-Batterien vorhanden ist.

Insbesondere für die Produktion von großformatigen Lithium-Ionen Zellen wird in Deutschland ein Potenzial gesehen. Der deutsche Anlagen und Maschinenbau besitzt bereits heute einen wesentlichen Teil aller Kompetenzen, um eine Fertigungslinie in Deutschland zu realisieren (Maiser et al.).

In Kombination mit den vorhandenen Herstellern von Anoden, Kathoden, Separatoren und Elektrolyten ließe sich eine potenzielle inländische Wertschöpfung darstellen, da Deutschland bis auf die Zellfertigung bereits alle Teile der Wertschöpfungs-

kette abdeckt. „Die Traktionsbatterie zelle hat mit einem Anteil von etwa 60–70 % eine hohe Bedeutung für die Wertschöpfung des Batteriepacks. Vor diesem Hintergrund spielt der Erhalt der gesamten Wertschöpfungskette am deutschen Standort eine entscheidende Rolle.“ (NPE 2016).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der nachhaltige Betrieb einer signifikanten Zellfertigung in Deutschland für die Zellgeneration 3a oder nachfolgend mit einer Produktionskapazität von etwa 13 GWh/Jahr möglich sein kann. Dieses wiederum hätte einen positiven Effekt auf Arbeitsplätze in Deutschland und böte das Potenzial in Deutschland ansässige Forschung und Industrie aufgrund der räumlichen Nähe enger zu verknüpfen. Eine Fertigung der Zellgeneration 2 wird aufgrund der klaren Dominanz japanischer, koreanischer und chinesischer Hersteller und derzeitigen Überkapazitäten in der Produktion nicht empfohlen (NPE 2016).

Aktuell besteht bei Lithium-Ionen Batterieherstellern die Wertschöpfung insbesondere im Bau von Systemen aus meist im asiatischen Raum zugekauften Zellen. Beispiele für Firmen sind hier ohne Anspruch auf Vollständigkeit BMZ, Akasol, GAIA und Bosch. Auf Zellebene sind Hersteller wie LIACON oder EAS für Spezialanwendungen schon heute konkurrenzfähig (vergleiche dazu Kapitel 4.6). Durch den Aufbau einer zukünftigen Zellfertigung in Deutschland kann dieser Anteil an der Wertschöpfung unter Umständen erhöht werden.

Weiterhin kann Deutschland unter Umständen von weiteren Europäischen Aktivitäten in diesem Bereich in Bezug auf Wertschöpfung z. B. durch „...ein Airbus für Batterien“ profitieren (SZ.de 2017).

In der Technologiegruppe der Redox-flow Batterien besitzt Deutschland bereits einen gewissen Anteil an der Wertschöpfung. Hierbei sei insbesondere auf große deutsche Hersteller der Redox-flow Batterien (Gildemeister energy solutions, Younicos) und auch Firmen im Bereich der Membranfertigung (Fumatech) verwiesen. Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Zukünftige elektrochemische Technologien wie Li/Luft und Li/S können perspektivisch durch die zahlreichen F&E Aktivitäten an Hochschulen und Forschungseinrichtungen in Deutschland adressiert werden. Hier besteht insbesondere Potenzial in Kooperation mit KMUs und Industrie eine hohe Wertschöpfung in Deutschland zu erreichen.

## 4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

### Teilkriterium 8.1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie

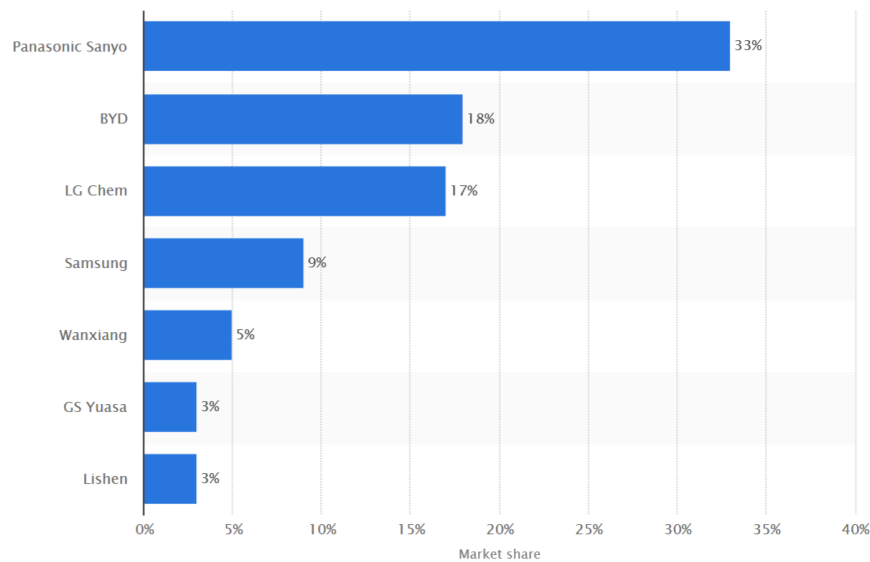
In der Technologiegruppe der Lithium-Ionen Batterien besitzen europäische und/oder deutsche Zellhersteller keine signifikanten Marktanteile. Die deutsche Industrie ist zu Großteilen Systemintegrator für Lithium-Ionen Zellen, mit einer Vielzahl von Firmen. Lithium-Ionen Zellen werden dabei größtenteils von den in Abb. 4-7 genannten Herstellern zugekauft. Diese befinden sich ausschließlich auf dem Ostasiatischen Markt (Japan, China, Südkorea). Es wird deutlich, dass es sich bei der Lithium-Ionen Technologie um eine bereits seit Jahren auf dem Markt etablierte Technologie handelt.

Auf Seiten der Zellfertigung sind deutsche Zellhersteller (EAS Germany, Liacon, Customcells) heutzutage in Einzelanwendungen mit speziellen Anforderungen konkurrenzfähig. In Bezug auf Batteriesysteme sind deutsche Hersteller wettbewerbsfähig (BMZ Group, Akasol) daher müssen bei diesem Kriterium zwei Kreuze vergeben werden.

**Tab. 4-1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologiegruppe Lithium-Ionen**

**Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieser Technologiegruppe weltweit?**

Technologiegruppe  Technologieführerschaft  wettbewerbsfähig  
 nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig  abgeschlagen



**Abb. 4-7 Erwarteter Anteil der Lithium-Ionen Zellhersteller am internationalen Markt für 2018**

Quelle: <https://www.statista.com/statistics/235323/lithium-batteries-top-manufacturers>

In der Technologiegruppe der Redox-flow Batterien nimmt Deutschland eine mindestens wettbewerbsfähige Position ein. Hierbei sei auf große deutsche Hersteller der Redox-flow Batterien (Gildemeister energy solutions, Younicos) verwiesen sowie auf Forschungsprojekte innerhalb der Technologiegruppe (siehe beispielsweise das E-WE-Projekt brine4power in Kapitel 3.1, welches derzeit das größte Redox-flow System der Welt darstellt).

**Tab. 4-2 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologiegruppe Redox-flow**

**Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieser Technologiegruppe weltweit?**

Technologiegruppe  Technologieführerschaft  wettbewerbsfähig  
 nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig  abgeschlagen

Aufgrund des nach wie vor zurückhaltendem Interesses an der Na-basierten Technologie wird Deutschland in dieser Technologiegruppe eine in Einzelanwendungen konkurrenzfähige Rolle zugesprochen unter der Voraussetzung, dass die Forschungsaktivitäten für diesen noch nicht kommerziell vertriebenen Batterietyp in den kommenden Jahren zunehmen. Aufgrund der regen Forschungsaktivität im Ausland, insbesondere der Vielzahl großer Demonstrationsprojekte innerhalb der USA (siehe Kapitel 3.1), sei darauf hingewiesen, dass die europäische und damit auch deutsche Rolle in dieser Technologiegruppe ohne weitere F&E Aktivität sich hin zu einer abgeschlagenen Rolle entwickeln könnte.

**Tab. 4-3 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologiegruppe Na-basiert**

**Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieser Technologiegruppe weltweit?**

Technologiegruppe  Technologieführerschaft  wettbewerbsfähig  
 nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig  abgeschlagen

Innerhalb der sich noch in der Grundlagenforschung befindlichen Technologiegruppen Lithium/Luft, Lithium/Schwefel, post-Lithium-Ionen ist der Status Deutschland nur schwer abzuschätzen. Forschungsaktivität findet insbesondere an Universitäten und Forschungseinrichtungen weltweit statt. Weitere Forschungsaktivität ist daher auch zukünftig zwingend erforderlich, um den Anschluss an neue Energiespeichertechnologien nicht zu verlieren.

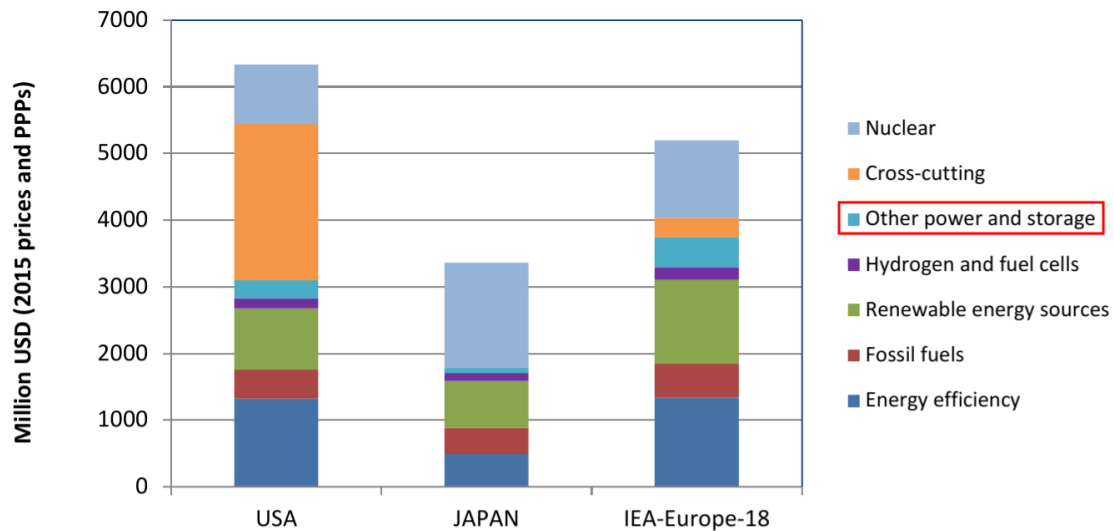
### Teilkriterium 8.2 F&E-Budgets

Die folgende Analyse basiert auf den Daten der International Energy Agency (IEA)<sup>1</sup>. Für Deutschland beinhalten die erhobenen Statistiken die Bundesförderung durch das 6. Energieforschungsprogramm, jedoch nicht die Förderung durch die Bundesländer. Des Weiteren ist im internationalen Vergleich die Förderung durch die Europäische Kommission im Rahmen des H2020 Programms nicht enthalten, die jedoch einen signifikanten Beitrag zur F&E Förderung innerhalb der EU und damit für Deutschland leistet (1,3 Milliarden € für 2014 und 2015, siehe Abb. 4-12).

Basierend auf der Auswertung der IEA-Daten nach Gigoux et al. 2016 zeigt ein Vergleich Europas und damit auch Deutschlands mit den USA und mit Japan in Abb. 4-

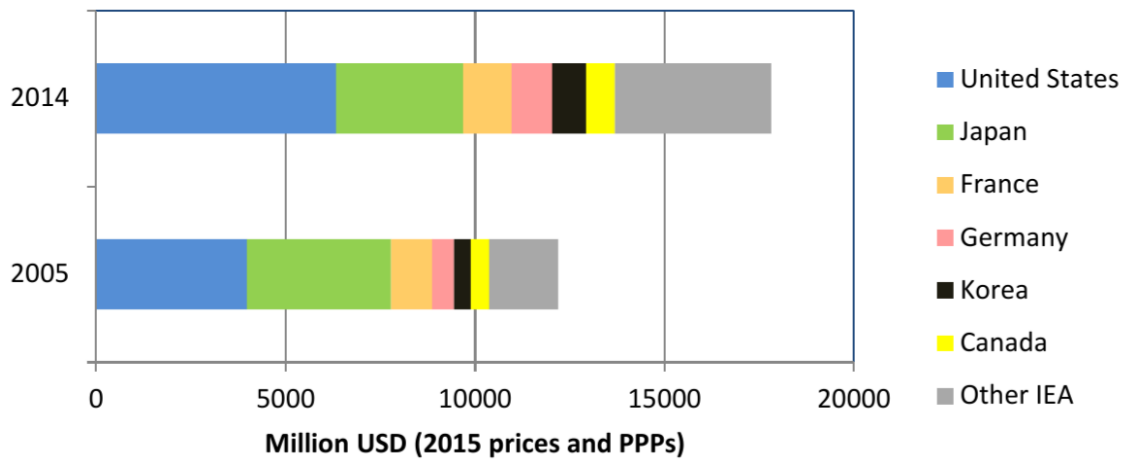
<sup>1</sup> [http://wds.iea.org/wds/ReportFolders/ReportFolders.aspx?CS\\_referer=&CS\\_ChosenLang=en](http://wds.iea.org/wds/ReportFolders/ReportFolders.aspx?CS_referer=&CS_ChosenLang=en)

8 (Technologiefeld Energiespeicher in hellblau), dass das Technologiefeld Energiespeicher einen vergleichsweise höheren Stellenwert einnimmt, als in den Vergleichsländern mit dem höchsten F&E Budget der IEA-Länder (siehe Abb. 4-9, China ist hierbei nicht enthalten).



**Abb. 4-8 Budget nach Technologiefeld für die USA, Japan und IEA-Daten für 18 Länder Europas (inkl. Deutschland) (2014)**

Quelle: Gigoux et al. (2016)



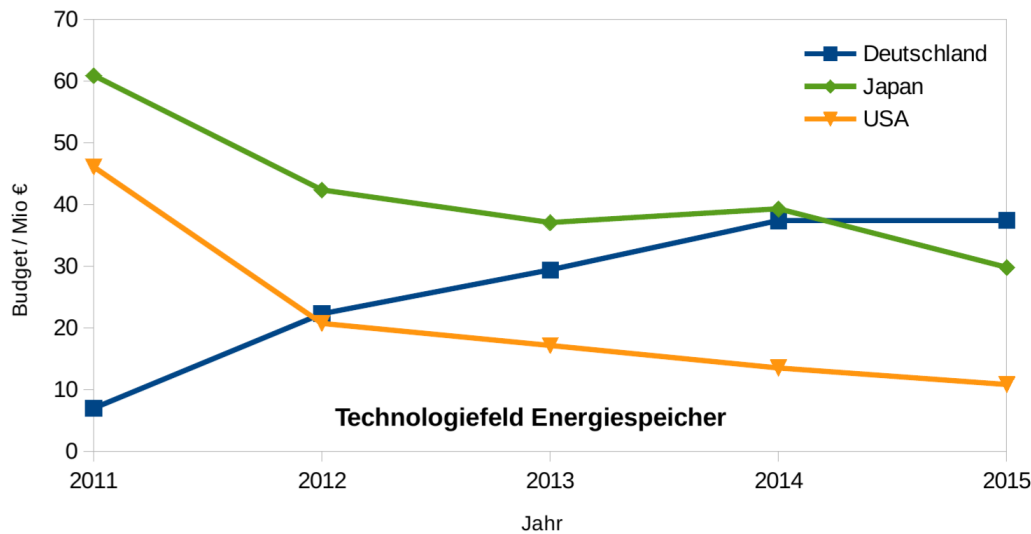
**Abb. 4-9 F&E Budget im internationalen Vergleich für 2005 und 2014**

Quelle: Gigoux et al. (2016)

Zusätzlich wurde die zeitliche Entwicklung des F&E Budgets für das Technologiefeld Energiespeicher für Deutschland, Japan und die USA aufgeschlüsselt (Abb. 4-10). Hierbei wird das gesamte Technologiefeld Energiespeicher in die Betrachtung mit einbezogen, da Daten für elektrochemische Energiespeicher nicht über den gesamten Zeitraum vorliegen bzw. hybride Systeme, die aus Kombinationen verschiedener Energiespeichern (unter anderem elektrochemische Energiespeicher) miteinbezogen werden sollen. Erneut bestätigt sich das Bild, dass das Technologiefeld der Energie-



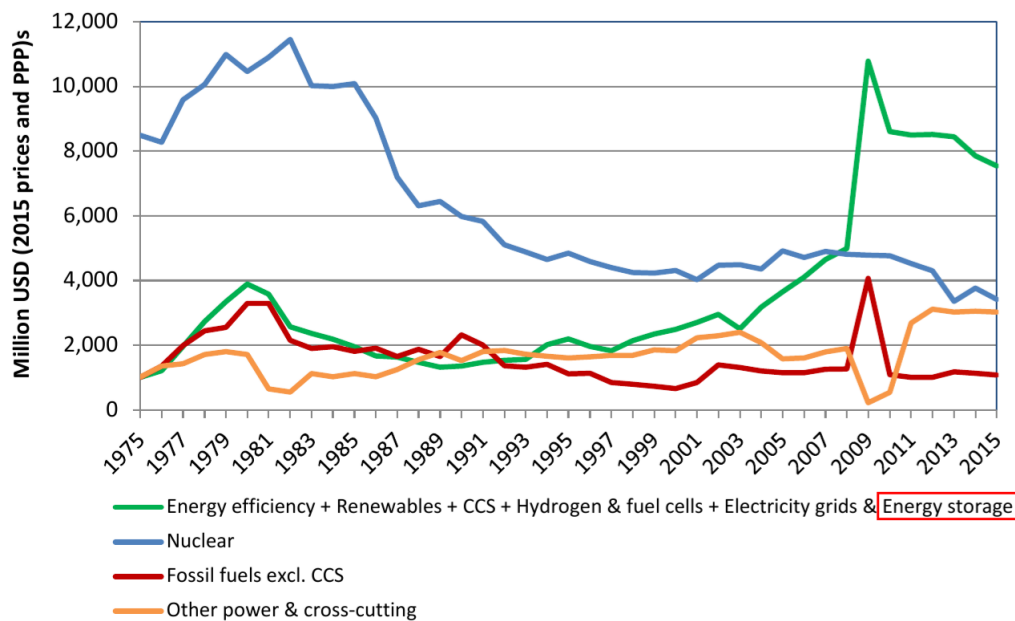
speicher in Deutschland einen zunehmend größeren Stellenwert einnimmt, während das F&E Budget in den beiden Vergleichsländern abnimmt.



**Abb. 4-10 Zeitliche Entwicklung des F&E Budgets für das Technologiefeld Energiespeicher für Deutschland, Japan und die USA**

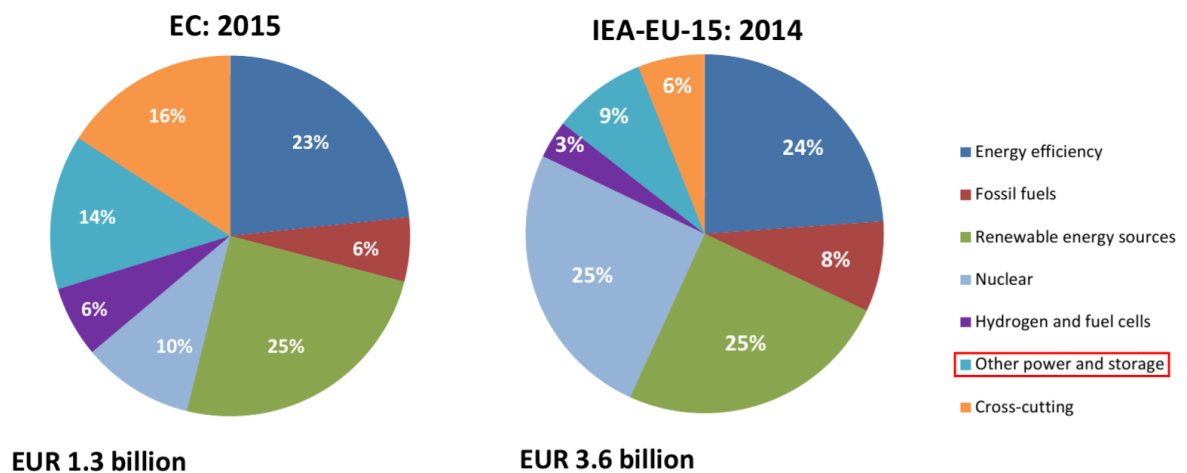
Quelle: nach den Daten von Gigoux et al. (2016)

Über eine Entwicklungsperiode von 40 Jahren des internationalen F&E Budgets ist ein zunächst langsamer (ab 2003), dann ein rasanter und steiler Anstieg (ab 2008) für den die Energiespeicher beinhaltenden Bereich zu beobachten und erreicht 2009 seinen Höchstwert (Abb. 4-11). Obwohl sich das F&E Budget für dieses Technologiefeld nach wie vor auf einem hohen Niveau befindet, ist ein deutlicher Abwärtstrend seit 2009 bis 2015 zu beobachten.



**Abb. 4-11 Prognose des internationalen F&E Budgets (20 Länder inkl. Deutschland) von 1975-2015**

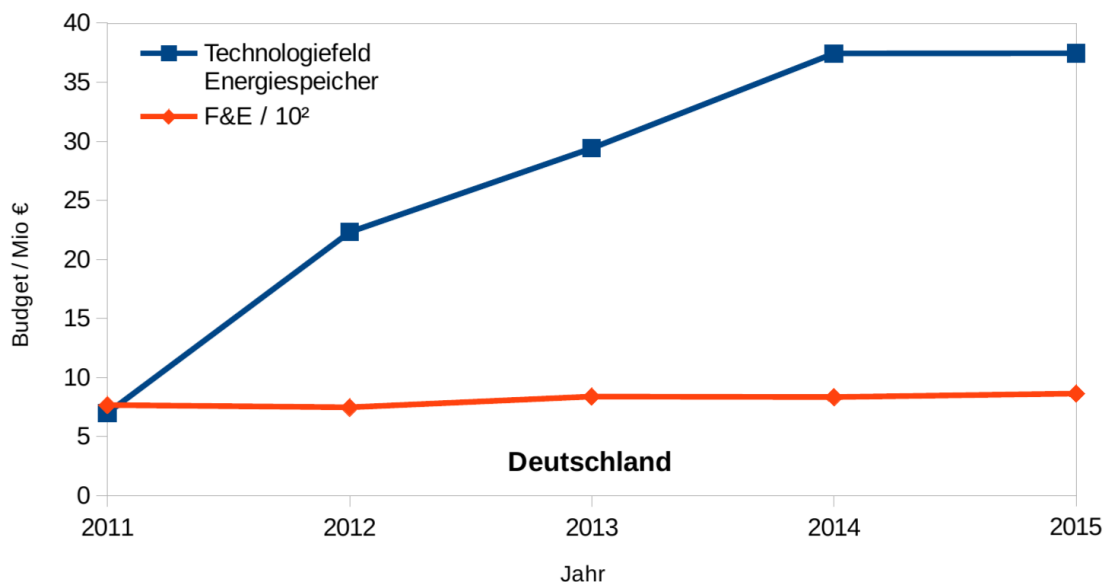
Quelle: Gigoux et al. (2016)



**Abb. 4-12 F&E Budget der Europäischen Kommission (H2020 Förderung 2014 und 2015) (links) und nationale Förderung für 15 europäische Länder (inkl. Deutschland) (rechts)**

Quelle: Gigoux et al. (2016)

Auf nationaler Ebene wird prozentual weniger in das Technologiefeld der Energiespeicher investiert (Abb. 4-12, rechts) als auf der übernationalen Ebene seitens der Europäischen Kommission (Abb. 4-12, links). Es sei jedoch angemerkt, dass das F&E Budget auf nationaler Ebene fast das Dreifache des Budgets darstellt, welches innerhalb der H2020 Förderung aufgebracht wurde.



**Abb. 4-13 Zeitliche Entwicklung des gesamten F&E Budgets und des F&E Budgets für das Technologiefeld Energiespeicher für Deutschland**

Quelle: nach den Daten von Gigoux et al. (2016)

Der Vergleich des gesamten F&E Budgets und des F&E Budgets für das Technologiefeld Energiespeicher innerhalb Deutschlands in Abb. 4-13 zeigt die steigende Relevanz der Energiespeicher in der Forschung und Entwicklung. Während das Gesamtbudget über die vergangenen fünf Jahre einen nahezu konstanten Wert ausweist,

nimmt in der gleichen Periode das Budget für das Technologiefeld Energiespeicher kontinuierlich zu bis zu einer vermeintlichen Sättigung in den Jahren 2014/2015.

Eine quantitative Aufführung des gesamten internationalen und nationalen F&E Budgets und für das Technologiefeld Energiespeicher sowie die zeitliche Entwicklung über die letzten fünf Jahre (2011-2015) ist in Tab. 4-4 dargestellt.

Die zeitliche Entwicklung wird als Differenz der F&E Budgets zweier aufeinander folgender Jahre für die angegebene Periode bestimmt, der prozentuale Anteil wird in Relation zum Vorjahr berechnet.

**Tab. 4-4 Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Energiespeicher – Input-Orientierung**

	Einheit	Wert
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene im jeweiligen Technologiefeld - Deutschland		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2015)	Mio. €	37,45
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ Mio. €/a	7,62
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	69,67
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	Mio. €	863,58
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	%	4,34
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	3,24
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene im jeweiligen Technologiefeld – Internationaler Vergleich		
F&E-Förderung der jeweiligen Technologie im OECD-Durchschnitt und/oder im Vgl. mit im Technologiefeld besonders aktivem Land/Ländern (ggf. nachfolgende Zeilen kopieren)		
(Vergleichsland 1)		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2015)	Mio. €	242,30
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ Mio. €/a	11,66
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	12,06
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	Mio. €	12628,34
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA	%	1,92
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	1,59

### Teilkriterium 8.3 F&E-Outputs

Die Betrachtung von Publikationen und Patenten ist ein guter Maßstab um sowohl das wissenschaftlich-technische Interesse als auch das wirtschaftliche Interesse an bestimmten Technologien darzustellen. Als Vergleichsgröße werden die mittleren Wachstumsraten (letzte 5 Jahre) in Prozent von wissenschaftlichen Publikationen der verschiedenen Technologien aus Deutschland und Weltweit herangezogen. Die

Differenz aus beiden Raten ist ein Indikator für die wissenschaftliche Aktivität Deutschlands in Vergleich zur Welt bezogen auf die jeweilige Technologie. Negative Werte implizieren eine geringe Dynamik in den jeweiligen Technologien.

**Tab. 4-5 Wissenschaftliche F&E Aktivität**

%	Differenz der Publikationsrate
NaNiCl	- 45
NaS	- 35
Li/S	+ 35
Li/Luft	- 15
Lithium-Ionen	+ 10
Redox-flow	- 48

Quelle: Thielmann et al. (2015)

Analog hierzu kann die mittlere Wachstumsrate von Patenten als ein eher wirtschaftsorientiertem Indikator herangezogen werden.

**Tab. 4-6 Wirtschaftliche F&E Aktivität**

%	Differenz der Patentrage
NaNiCl	+ 35
NaS	- 9
Li/S	+ 3
Li/Luft	- 3
Lithium-Ionen	- 1
Redox-flow	- 23

Quelle: Thielmann et al. (2015)

## 4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

**Tab. 4-7 Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld elektrochemische Speicher zum Status Quo (2015)**

Technologien	Ebene Markt	Ebene Gesellschaft	Lokale Ebene
	Marktakzeptanz	Sozialpol. Akzeptanz	Lokale Akzeptanz
	Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktakteure?	Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung / Diskurse; Image	Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie
Mittlere Akzeptanz (3)	Steigender Markt der PV-Heimspeicher zur Eigenverbrauchsoptimierung, Steigender Einsatz bei Primärenergieleistung und Industrieanwendungen, Sicherheitsaspekte bei Lithium-Ionen Batterien stehen einer höheren Akzeptanz entgegen. Weiterhin stehen unklare rechtliche/ Regulatorische Rahmenbedingungen, insbesondere in kombinierten Speicheranwendungsfällen einer höheren Akzeptanz entgegen.	Eher hohe Akzeptanz (2)  Gesellschaftlich werden Energiespeicher und auch elektrochemische Speicher als notwendig für das zukünftige Energiesystem angesehen. Allgemein gibt es daher eine hohe Akzeptanz. Dieses drückt sich auch in der hohen Anzahl an PV-Heimspeichern aus, die nicht nur aus wirtschaftlichen Gründen am Markt Erfolg haben. Eine hohe Akzeptanz wird unter anderem aus Recyclinggründen und mangelnder europäischer/ deutscher Zellfertigung nicht erreicht.	Eher hohe Akzeptanz (2)  Da elektrochemische Energiespeicher vom Standort her flexibel gebaut und geplant werden können gibt es kaum bis keine bekannten lokalen Konflikte. Elektrochemische Speicher treffen auf eine eher hohe lokale Akzeptanz. Eine Erhöhung der Autarkie und Erhöhung der Versorgungssicherheit bei zusätzlicher USV-Funktion wird positiv gesehen. Durch das Risiko eines Batteriebrandes könnte die lokale Akzeptanz grundsätzlich sinken, daher ist die Sicherheit der Systeme entscheidend für die lokale Akzeptanz.

Bewertung mittels 5-stufiger Skala: Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)

## 4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Elektrochemische Energiespeicher besitzen aufgrund der begrenzten Zyklenfestigkeit und kalendarischen Lebensdauer eine typische wirtschaftliche Nutzungsdauer zwischen 10 und 20 Jahren. Aufgrund der Flexibilität der Systeme ist die Planungs- und Bauzeit relativ gering. Durch Standardisierung und zunehmenden kommerziellen Produkten am Markt ist mit einer positiven Beeinflussung der Faktoren zu rechnen.

**Tab. 4-8 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes elektrochemische Energiespeicher**

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	3-12				
Bauzeit	Monate	6-18				
Heute übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer	Jahre	5-20		10-20		
Spezifische Investition	€ <sub>2015</sub> /kW	150-1.500		35-1.000		

#### 4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Elektrochemische Energiespeicher und deren Einsatz im elektrischen Netz sind abhängig von der Infrastruktur und dem Netzausbau. Ein Nutzen der Technologie ist nicht unabhängig vom Stromnetz möglich und der Einsatz von Speichern auch vom bestehenden Stromnetz abhängig. Ein Ausbau des elektrischen Netzes ist nicht zwangsweise erforderlich, kann jedoch sinnvoll sein. Neu Infrastrukturen außerhalb des Stromnetzes müssen nicht gebaut werden.

**Tab. 4-9 Abhängigkeit des Technologiefeldes elektrochemische Speicher von Infrastrukturen**

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

#### 4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

##### Anwendungsfall: "Systemdienstleistungen durch elektrochemische Speicher"

##### Teilkriterium 12.1 Rückwirkungen

„Mit dem Ausbau von Erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung und der daraus entstehenden Aufgabe, nicht bedarfsgerecht (volatil) erzeugten Strom auszugleichen, wird die Funktion der Speicher häufig auf die Ein- und Ausspeicherung des überschüssigen erneuerbaren Stroms beschränkt. Die unterschiedlichen Arten von Speichern sowie deren unterschiedliche technische Möglichkeiten sind jedoch in der Lage, einen Beitrag zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen und damit zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit zu leisten.“ (Petersen et al. 2016)

Im Einzelfall und bei einem großen Bestand sind positive Rückwirkungen auf das Gesamtsystem gegeben, da durch den Speicher Systemdienstleistungen (Bereitstellung von Flexibilität im elektrischen Netz) erbracht werden. Nach (Petersen et al. 2016) müssen zur Beurteilung der Rückwirkungen folgende Anwendungsfälle für Systemdienstleistungen grundsätzlich unterschieden werden: a) Netzengpassmanagement, b) Gradientensteuerung, c) Frequenzhaltung durch Wirkleistungsregelung (z. B. Primärregelleistung), d) Spannungshaltung und –qualität, e) Versorgungssicherheit und Wiederaufbau.

Im Einzelfall können unter Umständen mehrere Systemdienstleistungen durch einen elektrochemischen Speicher erbracht werden, im großen Bestand auch durch mehrere Systeme.

### **Teilkriterium 12.2 Anpassungsbedarf**

Im Einzelfall besitzen elektrochemische Energiespeicher zur Erbringung von Systemdienstleistungen bereits Systemkompatibilität, da sie für diesen Zweck ausgelegt wurden. Neben dem Speicher an sich spielt hier die Leistungselektronik (bidirektionaler DC-AC-Wandler) eine entscheidende Rolle für die Kompatibilität zum elektrischen Netz. Im Einzelfall und im großen Bestand sind unter Umständen entsprechend Kommunikationsstrukturen zur Steuerung und Regelung der (verteilten) Speicher notwendig. Weiterhin muss der jeweilige Standort im Netz bei der Integration des Speichers berücksichtigt werden.

### **Teilkriterium 12.3 Wechselwirkungen**

Im Einzelfall und großem Bestand können elektrochemische Speicher zur Systemstabilität durch die Erbringung von Systemdienstleistungen beitragen. Sie stehen ggf. aber auch in Konkurrenz zu anderen Speicher-Optionen wie z. B. Pumpspeichern, Druckluftspeichern oder Power-to-Gas. Weiterhin stehen sie ggf. in Konkurrenz zu Demand-Side Management oder des Managements der Erzeugung (z. B. Abregelung). Insgesamt lässt sich jedoch feststellen, dass sich die Anwendungsfelder von elektrochemischen, chemischen und mechanischen Energiespeichern Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften in einem zukünftigen Energiesystem mit hohem Anteil EE sehr gut ergänzen und nur in gewissen Anwendungsbereichen konkurrieren.

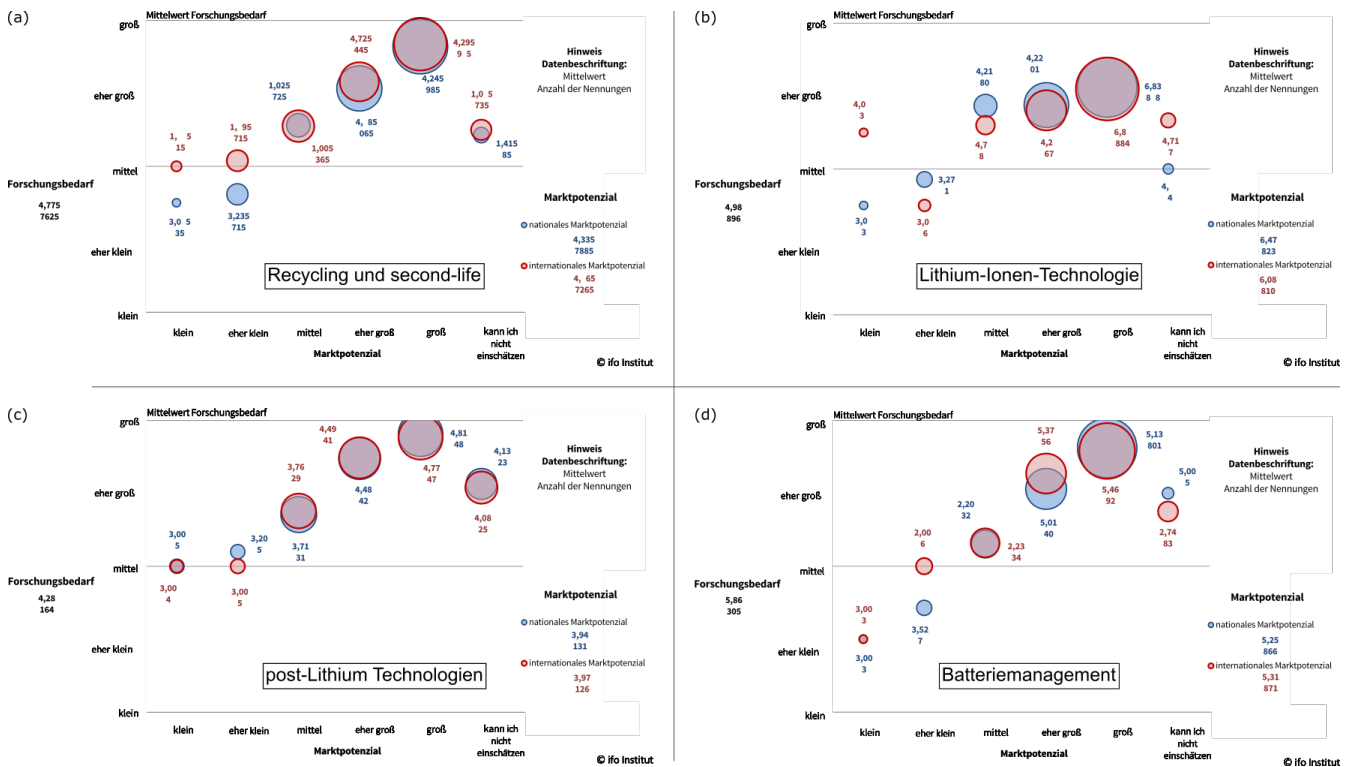
## 5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

Einhergehend mit der Maturität und der Etablierung der Lithium-Ionen Technologie sowie post-Lithium-Ionen und anderer zukünftiger Batterietypen erfährt das Themenfeld Recycling elektrochemischer Energiespeicher zunehmend an Bedeutung. Bisher ist die F&E-Tätigkeit vor allem auf dem Gebiet der Blei-Säure Batterien in der wissenschaftlichen Literatur präsent, daher besitzt Recycling laut der hier durchgeführten Onlineumfrage sowohl einen hohen Forschungsbedarf als auch ein hohes Marktpotenzial. Insbesondere in Hinblick auf die Massenproduktion tritt die Wiederverwertung und Aufschlüsselung nicht nur der teuren Additive elektrochemischer Speicher sondern auch der Grundbestandteile wie Lithium und Graphit in den Vordergrund, um einer Ressourcenknappheit vorzubeugen.

Gleichzeitig mit dem Thema des Recyclings wird den second-life Konzepten eine zunehmende Wichtigkeit beigemessen. Die Verwendung elektrochemischer Energiespeicher, die in der Elektromobilität ausgedient haben, als stationäre Speicher bietet ein nicht zu unterschätzendes Marktpotenzial, welches mit dem Wachstum des Elektromobilitätssektors einhergeht. Hierbei sei auf die Studie des Bundesverbandes Erneuerbarer Energien hingewiesen (Reid et al. 2016), in der das Potenzial dieses Wachstums für second-life Batterien als Zwischenspeicher für erneuerbare Energien untersucht wird. Entscheidend für Second-Life-Konzepte sind insbesondere auch schnelle Methoden zur Bestimmung des Gesundheitszustand der Batterie.

Dieser Sachverhalt ist noch einmal in Abb. 5-1 (a) zu sehen, welche die Resultate der Onlineumfrage für die Kernfragen darstellt, die das höchste Marktpotenzial und gleichzeitig den größten Forschungsbedarf aufwiesen.





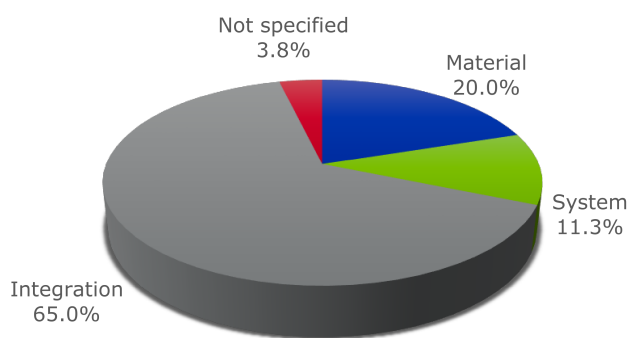
**Abb. 5-1 Online-Umfrage: Höchstes Marktpotenzial und größter Forschungsbedarf für (a) Recycling und second-life, (b) Lithium-Ionen Technologie, (c) post-Lithium Technologien und (d) Batteriemangement**

Quelle: Ifo et al. 2017

Das Wachstum des Elektromobilitätssektors und die neuen Anforderungen an Reichweite und Zuverlässigkeit verlagern ebenfalls den Forschungsschwerpunkt der Technologien der stationären Energiespeicherung, so dass zukünftig neue Technologien (post-Lithium-Ionen, Lithium/Schwefel, Redox-flow, etc.) sowie neue Elektrolytkonzepte (z. B. All-solid-state) auf der Materialebene einen hohen Forschungsbedarf bedingen (siehe Ergebnisse der Onlineumfrage in Abb. 5-1 (b) und (c)).

Des Weiteren weisen die BATSTORM Studie und die durchgeführte Onlineumfrage in Abb. 5-1 (d) darauf hin, dass die Systemebene elektrochemischer Energiespeicher bisher nur unzureichend adressiert wurde. Dies zeigt sich in einem Fehlen von Standards sowohl in Bezug auf Batteriefertigung und -design als auch in Bezug auf das Batteriemangement, welches insbesondere das für die Lithium-Ionen Technologie sicherheitsrelevante elektrische und thermische Management beinhaltet. Die Grundlage für das Batteriemangement ist eine zuverlässige und genaue Bestimmung des Batteriezustandes unter anderem unter Einbezug der Alterung des Energiespeichers.

Die Integration elektrochemischer Energiespeicher in das bestehende Netz ist ein nicht zu vernachlässigender Bestandteil zur Erhöhung des Anteils regenerativer Energien am Gesamtenergieverbrauch, jedoch wurde und wird dieses Themenfeld intensiv erforscht. Sowohl die Resultate der BATSTORM Studie (Abb. 5-2) als auch die durchgeführte Onlineumfrage weisen darauf hin, dass ein deutlich höherer Forschungsbedarf auf der Material- und auf der Systemebene der elektrochemischen Energiespeicher besteht.



---

**Abb. 5-2** Verteilung der in der EU durchgeführten F&E Projekte auf die drei Ebenen

Quelle: Schledde et al. (2016)

Neben technischen Aspekten bedarf es jedoch auch „...eines Abbaus bestehender regulatorischer Hemmnisse, die die Integration von Speichern behindern.“ (Petersen et al. 2016)

## Literaturverzeichnis

- Alotto, Piergiorgio; Guarnieri, Massimo; Moro, Federico (2014): Redox flow batteries for the storage of renewable energy. A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, S. 325–335.
- Arora, Shashank; Shen, Weixiang; Kapoor, Ajay (2016): Review of mechanical design and strategic placement technique of a robust battery pack for electric vehicles. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, pp. 1319–1331.
- Bandhauer, Todd M.; Garimella, Srinivas; Fuller, Thomas F. (2011): A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries. In: *J. Electrochem. Soc.* 158 (3), R1.
- Bloch, Matthias (2014): Was man über Lithium-Schwefel-Akkus wissen muss. In: <http://www.elektroniknet.de/elektronik/power/was-man-ueber-lithium-schwefel-akkus-wissen-muss-105459.html>. Letzter Zugriff: 08. 09 2011.
- Bruce, Peter G.; Freunberger, Stefan A.; Hardwick, Laurence J.; Tarascon, Jean-Marie (2011): Li-O<sub>2</sub> and Li-S batteries with high energy storage. In: *Nature materials* 11 (1), S. 19–29.
- Cho, Jaephil; Jeong, Sookyung; Kim, Youngsik (2015): Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 48, S. 84–101.
- Christensen, Jake; Albertus, Paul; Sanchez-Carrera, Roel S.; Lohmann, Timm; Kozinsky, Boris; Liedtke, Ralf et al. (2012): A Critical Review of Li/Air Batteries. In: *J. Electrochem. Soc.* 159 (2), R1.
- DOE Global Energy Storage Database: [http://www.energystorageexchange.org/projects/data\\_visualization](http://www.energystorageexchange.org/projects/data_visualization). Letzter Zugriff: 16.08.2017
- European Commission: Towards an Integrated SET-Plan: Accelerating the European Energy System Transformation - Become competitive in the global battery sector to drive e-mobility forward, *ISSUES PAPER No 7*.2016.05.10. <https://setis.ec.europa.eu/>
- Eyer, Jim; Corey, Garth (2010): Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potenzial Assessment Guide. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. Hg. v. Sandia National Laboratories. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550 (SAND2010-0815). <http://www.ntis.gov/help/ordermethods.asp?loc=7-4-0#online>. Letzter Zugriff: 08.03.2016.
- Fang, Xin; Peng, Huisheng (2015): A revolution in electrodes. Recent progress in rechargeable lithium-sulfur batteries. In: *Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)* 11 (13), S. 1488–1511.
- Figgenger, Jan; Haberschusz, David; Kairies, Kai-Philipp; Wessels, Oliver; Tepe, Benedikt; Ebbert, Markus; Herzog, Reiner; Sauer, Dirk Uwe (2017): Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0 - Jah-

- resbericht 2017. Hg. v. Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen. Aachen.
- Fraunhofer IWES (2017): Barometer der Energiewende. Kassel.  
<https://www.herkulesprojekt.de/de/Barometer.html>
- Fuchs, Georg; Lunz, Benedikt; Leuthold, Matthias; Sauer, Dirk Uwe (2012): Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität. Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien. Hg. v. Smart Energy for Europe Platform. ISEA RWTH Aachen. Berlin. Letzter Zugriff: 26.01.2016.
- Fürstenwerth, Daniel; Waldmann, Lars (2014): Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistung und im Verteilnetz. Studie. Unter Mitarbeit von Michael Sterner, Martin Thema, Fabian Eckert, Albert Moser, Andreas Schäfer, Tim Drees, Christian Rehtanz, Ulf Häger, Jan Kays, Andre Seack, Dirk Uwe Sauer, Matthias Leuthold. Hg. v. Agora Energiewende. Letzter Zugriff: 01.02.2017.
- Gigoux, Remi, Quadrelli, Roberta (2016): Statistics - Key trends in IEA public energy technology RD&D budgets. *IEA (International Energy Agency) Energy Data Centre*. <http://www.iea.org/statistics/RDDonlinedataservice>
- Hueso, Karina B.; Armand, Michel; Rojo, Teófilo (2013): High temperature sodium batteries. Status, challenges and future trends. In: *Energy Environ. Sci.* 6 (3), S. 734.
- Ifo Institut (2017): Auswertung der online-Umfrage unter den BMWi-Forschungsnetzwerken. Teilbereich TF\_Energiewende. München.
- Korthauer, Reiner (Hg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin: Springer Vieweg.
- Li, Malan; Liu, Junsheng; Han, Wei (2016): Recycling and management of waste lead-acid batteries. A mini-review. In: *Waste management & research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association*, ISWA 34 (4), pp. 298–306.
- Maiser, E.; Michaelis, S.; Müller, D.; Heimes, H.; Kampker, A. et al.: Batteriezellproduktion in Deutschland. Chancen für den Maschinen- und Anlagenbau. Letzter Zugriff: 13.01.2016.
- McKenna, Eoghan; McManus, Marcelle; Cooper, Sam; Thomson, Murray (2013): Economic and environmental impact of lead-acid batteries in grid-connected domestic PV systems. In: *Applied energy* 104, pp. 239–249.
- Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) (2016): Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland. Januar 2016. [http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/NPE\\_AG2\\_Roadmap\\_Zellfertigung\\_final\\_bf.pdf](http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG2_Roadmap_Zellfertigung_final_bf.pdf)

- Petersen, Maren; Timm, Mathias (2016): Bereitstellung von (System-) Dienstleistungen im Stromversorgungssystem: Beitrag von Energiespeichern. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
- Rahman, M. A.; Wang, X.; Wen, C. (2013): High Energy Density Metal-Air Batteries. A Review. In: *J. Electrochem. Soc.* 160 (10), A1759-A1771.
- Reid, Gerard; Julve, Javier (2016): Second Life-Batterien als flexible Speicher für Erneuerbare Energien. Kurzstudie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbarer Energien e. V. und der Hannover Messe.
- Saw, Lip Huat; Ye, Yonghuang; Tay, Andrew A.O. (2016): Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack. In: *Journal of Cleaner Production* 113, pp. 1032–1045.
- Schledde, Dominik; Dabrowski, Tatjana; Puchta, Matthias; Munzel, Benjamin; Husy, Charlotte; Lipphardt, Marvin; Hartmann; Lena (2016): Support to R&D Strategy for battery based energy storage - Technical analysis of ongoing projects (D5). Ecofys 2016 by order of: European Commission Directorate General Energy. [www.batstorm-project.eu](http://www.batstorm-project.eu)
- Stenzel, Peter (2015): Bereitstellung von Primärregelleistung durch stationäre Großbatteriespeicher. LRST Kolloquium Regenerative Energien SS 2016. [https://juser.fz-juelich.de/record/809893/files/Vortrag %20LRST %202016 %20PRL.pdf](https://juser.fz-juelich.de/record/809893/files/Vortrag%20LRST%202016%20PRL.pdf)
- SZ (2017): Europas Autohersteller sollen zusammen Batterie bauen. Süddeutsche Zeitung. 18. September 2017. <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/e-mobiliaet-europas-autohersteller-sollen-zusammen-batterie-bauen-1.3669877>.
- Thielmann, Axel; Sauer, Andreas; Schnell, Mario; Isenmann, Ralf; Wietschel, Martin (2015): Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.
- Thielmann, Axel; Sauer, Andreas; Isenmann, Ralf; Wietschel, Martin; Plötz, Patrick (2012): Produkt-Roadmap Lithium-Ionen Batterien 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.
- Tian, Xi; Gong, Yu; Wu, Yufeng; Agyeiwaa, Amma; Zuo, Tiejong (2014): Management of used lead acid battery in China. Secondary lead industry progress, policies and problems. In: *Resources, Conservation and Recycling* 93, pp. 75–84.
- van der Kuijp, Tsering Jan; Huang, Lei; Cherry, Christopher R. (2013): Health hazards of China's lead-acid battery industry. A review of its market drivers, production processes, and health impacts. In: *Environmental health: A global access science source* 12, p. 61.
- Weber, Adam Z.; Mench, Matthew M.; Meyers, Jeremy P.; Ross, Philip N.; Gostick, Jeffrey T.; Liu, Qinghua (2011): Redox flow batteries. A review. In: *J Appl Electrochem* 41 (10), S. 1137–1164.
- Yin, Ya-Xia; Yao, Hu-Rong; Guo, Yu-Guo (2016): Scientific and technological challenges toward application of lithium–sulfur batteries. In: *Chinese Phys. B* 25 (1), S. 18801.