

Entwicklung von Kriterien und Herstellerempfehlungen für ein Förderprogramm der EWS zu Photovoltaik-Batteriespeichern

Kurzstudie für die
Elektrizitätswerke Schönau Vertriebs GmbH (EWS)

Freiburg, 30.11.2017

Autorinnen und Autoren

Kathrin Graulich
Öko-Institut e.V.

Andreas Manhart
Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

**Aktueller Hinweis des Öko-Instituts zur vorliegenden Kurzstudie
„Entwicklung von Kriterien und Herstellerempfehlungen für ein Förderprogramm der EWS
zu Photovoltaik-Batteriespeichern“**

Die vorliegende Kurzstudie des Öko-Instituts ist am 30.11.2017 fertiggestellt und veröffentlicht worden. Wir möchten darauf hinweisen, dass aufgrund des rasanten technologischen Fortschritts im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien inzwischen die Kurzstudie bzgl. einer Reihe von Details nicht mehr auf dem aktuellen Stand ist, u.a. gibt es einen starken Trend bei LNMC-Batterien hin zu geringeren Kobaltanteilen, Änderungen der Versorgungsmuster von einzelnen Rohstoffen (z.B. ist neuerdings Australien mit Abstand das größte Lithiumförderland) und, je nach Konfiguration der kompletten Batterie, das Potential für Optimierungen bei Sicherheit und Zyklenfestigkeit.

In jüngster Zeit (pv magazine September 2019) wurde deutliche Kritik an der Quellenlage und deren Bewertung in der Kurzstudie zu den beiden Kriterien Sicherheit und Lebensdauer artikuliert. Aus unserer heutigen Sicht ist diese Kritik in einer Reihe von Punkten gerechtfertigt; daher würde das Öko-Institut heute bei den beiden Kriterien Lebensdauer sowie Sicherheit nicht mehr zwischen LFP und LNMC Batterien unterschiedlich werten. Daher sind entsprechende Passagen in der Kurzstudie vom November 2017 überholt. In diesem Zusammenhang weisen wir hier ausdrücklich darauf hin, dass sich durch weitere technologische Entwicklungen (z.B. Veränderungen der Zellchemie) sowie mögliche Veränderungen bei Materialzusammensetzung und Förder- und Lieferbeziehungen auch die Bewertungen zu Gefahrstoffen und Rohstoffen verändern können oder auch neue Bewertungen bislang enthaltender Stoffe möglich sind.

Das Hauptziel der Kurzstudie war die Unterstützung der EWS bei Auflage eines begrenzten und privatwirtschaftlich finanzierten Förderprogramms. Dabei wurden erstmals ökologisch relevante Aspekte wie Qualität und Langlebigkeit (z.B. Garantiezeiten, Wartungs- und Reparaturservice, reparatur- und recyclingförderliches Design), Rücknahmesystem fürs spätere Recycling, sowie ein netzdienlicher Betrieb von Photovoltaik-Batteriespeichern einbezogen. Das Öko-Institut ist nach wie vor davon überzeugt, dass Förderprogramme für Batteriespeicher Nachhaltigkeitskriterien berücksichtigen sollten. In dieser Hinsicht begrüßt das Öko-Institut eine konstruktive Diskussion zur Erarbeitung entsprechender Anforderungen und Standards.

Freiburg, 02.10.2019

Kathrin Graulich und Andreas Manhart

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	4
Zusammenfassung	5
1. Hintergrund	9
2. Auswahl der für das EWS-Förderprogramm in Frage kommenden Speichertechnologie(n)	9
2.1. Am Markt vorhandene Technologien bei Photovoltaik-Batteriespeichern	9
2.2. Allgemeiner Systemvergleich der PV-Batteriespeichertechnologien	11
2.3. Ökologische Bewertung der PV-Batteriespeichertechnologien	14
2.3.1. Materialzusammensetzung	14
2.3.2. Verfügbarkeit der Rohstoffe	16
2.3.3. Umwelt- und soziale Auswirkungen bei der Primärgewinnung der Rohstoffe	16
2.3.4. Umwelt- und Gesundheitsrelevanz	17
2.3.5. Treibhausgasemissionen	19
2.3.6. Recycling	19
2.3.7. Cradle to Cradle® Zertifikat der Salzwasserbatterie	21
2.4. Zusammenfassende Empfehlung: Auswahl der grundsätzlich für das EWS-Förderprogramm in Frage kommenden Speichertechnologie(n)	23
3. Weitergehende Kriterien zur Beurteilung der Aufnahme von spezifischen PV-Batteriespeichern in das EWS-Förderprogramm	25
4. Aufnahme von spezifischen PV-Batteriespeichersystemen in das EWS-Förderprogramm	30
5. Anhang	31
5.1. Fragebogen an die Hersteller von PV-Batteriespeichersystemen	31
5.2. Alphabetische Übersicht der angeschriebenen Hersteller von Salzwasser- und Lithium-Eisenphosphat-Batterien	39
5.3. Gefahreneinstufung der Inhaltsstoffe verschiedener Batterietechnologien	40
Literaturverzeichnis	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Kriterien zur Beurteilung der Aufnahme von spezifischen PV-Batteriespeichern in das EWS-Förderprogramm	25
Abbildung 5-1:	Gliederung des Fragebogens zu PV-Batteriespeichersystemen	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Technischer Vergleich der verschiedenen PV-Speichertechnologien	11
Tabelle 2-2:	Spezifischer Materialbedarf für Batteriespeichersysteme auf Basis von Blei-Säure und Lithium-Ionen (nur Zellmaterialien)	14
Tabelle 2-3:	Materialzusammensetzung von Salzwasserbatterien (Gesamtbatterie)	15
Tabelle 2-4:	Einstufung der Aquion Aspen Salzwasserbatterie nach Cradle to Cradle®	21
Tabelle 2-5:	Zur Aufnahme in das EWS-Förderprogramm vorgeschlagene Batterietechnologien	23
Tabelle 2-6:	Batterietechnologien, die nicht zur Aufnahme ins EWS-Förderprogramm vorgeschlagen werden	24
Tabelle 5-1:	GefahrenEinstufung der Inhaltsstoffe von Blei-Säure-Batterien	40
Tabelle 5-2:	GefahrenEinstufung der Inhaltsstoffe von LNMC / LFP-Batterien	40
Tabelle 5-3:	GefahrenEinstufung der Inhaltsstoffe von Salzwasser-Batterien	41

Zusammenfassung

Die Elektrizitätswerke Schönau Vertriebs GmbH hat für ihre Stromkunden ein Förderprogramm für Batteriespeicher aufgelegt, mit denen Privathaushalte den Eigenverbrauch ihres durch Solaranlagen erzeugten Stroms erhöhen können. Die vom Öko-Institut im Rahmen der vorliegenden Studie entwickelten Förderkriterien bilden die Grundlage zur Bewertung der Speichersysteme.

Speichertechnologien: Blei, Lithium oder Salzwasser?

Der Markt für Speichersysteme für Solaranlagen ist vielfältig. Dominierten früher Bleibatterien, sind heute Lithium-Ionen-Batterien mit über 90 Prozent Marktanteil verbreitet, im Wesentlichen Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (LNMC) und Lithium-Eisenphosphat (LFP). Als Alternative gibt es zudem die so genannte Salzwasser-Batterie. Die vorliegende Studie beschreibt zunächst, welche dieser Speichertechnologien grundsätzlich empfehlenswert sind. Im Fokus stehen dabei die Kriterien Gefahrstoffe, Sicherheit und Lebensdauer sowie eingesetzte Rohstoffe und Recycling.

Die Analyse zeigt, dass keine der Batterietechnologien uneingeschränkt empfehlenswert ist. Bei Salzwasser- und Lithium-Eisenphosphat-Batterien überwiegen jedoch die positiven Aspekte.

Zur Aufnahme in das EWS-Förderprogramm vorgeschlagene Batterietechnologien

Salzwasser-Batterien	<ul style="list-style-type: none"> · Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe:</u> Die in den Batteriezellen enthaltenen Substanzen sind überwiegend nicht als Gefahrstoffe für Umwelt oder Gesundheit klassifiziert bzw. besitzen im Vergleich zu den anderen Batterietechnologien vergleichsweise niedrige Wirkfaktoren. – <u>Sicherheit:</u> Der wässrige Elektrolyt ist weder brennbar noch explosiv. Die Batterie ist laut Hersteller wartungsfrei. – <u>Entladetiefe:</u> bis zu 100 Prozent. – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad:</u> Höher als beim Durchschnitt der Blei-Säure-Batterien. · Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad:</u> Niedriger als beim Durchschnitt der Lithium-Batterien. – <u>Volumetrische Energiedichte:</u> Sehr niedrig (d.h. steigender Raumbedarf oder geringere Speicherkapazität).
Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP)	<ul style="list-style-type: none"> · Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe:</u> Das positive Aktivmaterial LFP ist nicht als Gefahrstoff für Umwelt und Gesundheit klassifiziert. – <u>Sicherheit:</u> Innerhalb der Lithium-Batterien besitzen LFP-Batterien eine geringere Energiedichte; bei hohen Temperaturen zersetzt sich LFP nicht wie LNMC unter zusätzlicher Sauerstoffentwicklung. – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad:</u> Sehr hoch; Anzahl Vollzyklen bei LFP- etwas höher als bei LNMC-Batterien. · Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe:</u> Leitsalz und Lösemittel des Elektrolyten sind, wie bei LNMC-Batterien, als Gefahrstoffe für Umwelt und Gesundheit klassifiziert, allerdings mit niedrigeren Wirkfaktoren im Vergleich zu den Substanzen der Blei-Säure-Batterie.

	– <u>Sicherheit</u> : Gefahr des „thermal runaway“.
--	---

Quelle: Öko-Institut e.V.

Nicht zur Aufnahme ins EWS-Förderprogramm empfohlene Batterietechnologien

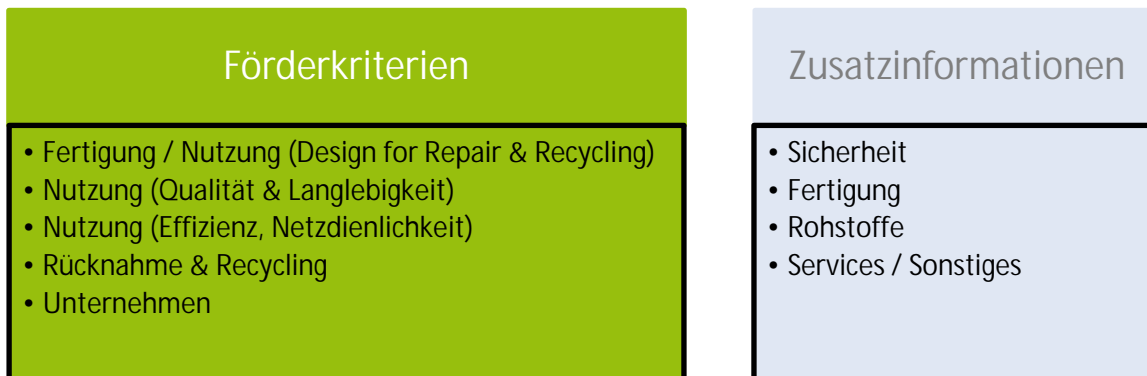
Lithium-Mangan-Kobalt-Oxid-Batterien (LNMC)	<ul style="list-style-type: none"> • Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Das positive Aktivmaterial LNMC ist als Gefahrstoff für Umwelt und Gesundheit mit relativ hohen Wirkfaktoren klassifiziert. Auch Leitsalz und Lösemittel des Elektrolyten sind, wie bei LFP-Batterien, als Gefahrstoffe für Umwelt und Gesundheit klassifiziert, allerdings mit niedrigeren Wirkfaktoren im Vergleich zu den Substanzen der Blei-Säure-Batterie. – <u>Sicherheit</u>: Gefahr des „thermal runaway“. Innerhalb der Lithium-Batterien besitzen LNMC-Batterien eine höhere Energiedichte; bei hohen Temperaturen wird im Laufe der Reaktion Sauerstoff freigesetzt, so dass diese Batterien schwerer zu löschen sind. – <u>Rohstoffe</u>: Kobalt ist als „kritischer Rohstoff“ eingestuft mit dem Risiko von Versorgungsengpässen für die EU. Die Primärgewinnung im Kongo erfolgt unter unzureichenden Arbeitsbedingungen. • Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad</u>: Sehr hoch – <u>Recycling</u>: Innerhalb der Lithium-Batterien sind LNMC-Batterien interessanter für Recyclingbetriebe; Kobalt und Nickel sind aktuell aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv und werden zurückgewonnen.
Bleibatterien	<ul style="list-style-type: none"> • Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Die in den Batteriezellen enthaltenen Substanzen sind als Gefahrstoffe für Umwelt oder Gesundheit klassifiziert und besitzen im Vergleich zu den anderen Batterietechnologien die höchsten Wirkfaktoren. – <u>Rohstoffe</u>: Die Primärgewinnung von Blei in außereuropäischen Ländern zählt zu den am stärksten umwelt- und gesundheitsgefährdenden Prozessen der Welt. – <u>Lebensdauer, Wirkungsgrad und Entladetiefe</u>: Im Vergleich zu den anderen Batterietechnologien am niedrigsten. – <u>Volumetrische Energiedichte</u>: Niedrig (d.h. steigender Raumbedarf oder geringere Speicherkapazität). – <u>Wartungsaufwand</u>: Hoch (Ausnahme: VRLA-Typ, d.h. „valve regulated lead-acid battery“) • Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Recycling</u>: Etablierte Recycling-Infrastruktur in Industrieländern wie Deutschland, mit hohen Recyclingeffizienzen.

Quelle: Öko-Institut e.V.

Umwelt- und qualitätsbezogene Förderkriterien für das EWS-Förderprogramm

In einem zweiten Schritt hat das Öko-Institut weitergehende ökologische Kriterien entwickelt, nach denen die Aufnahme spezifischer PV-Batteriespeicher in das EWS-Förderprogramm beurteilt werden kann. Qualität und Langlebigkeit, Designaspekte im Hinblick auf Reparatur- und Recyclingfreundlichkeit, Rücknahme am Ende der Lebensdauer sowie Serviceangebote für Kunden sind wichtige Unterscheidungsmerkmale.

Kriterien zur Beurteilung von PV-Batteriespeichern



Quelle: Öko-Institut e.V.

Netzdienliche Batteriespeicher als Baustein der Energiewende

Verbraucher sollten in ihre Investitionsentscheidung nicht nur Speicherkapazität, Wartungsaufwand und Kosten, sondern auch Umweltrelevanz, Langlebigkeit und Netzdienlichkeit einbeziehen.

Steht für den einzelnen Haushalt die Erhöhung des Eigenverbrauchs im Vordergrund, kann dies im Sinne der Energiewende möglicherweise sogar kontraproduktiv sein: Je nach Wirkungsgrad des Batteriesystems geht ein Teil des aus Sonnenenergie gewonnenen Stroms verloren und kann nicht mehr zur Verdrängung von Strom aus fossiler Erzeugung beitragen. Die Summe der dezentralen Batterien sollte vielmehr dabei helfen die Schwankungen der Erneuerbaren Energien auszugleichen, indem sie zum Beispiel lokale Netze bei Auslastungsspitzen entlasten oder den Strom zu Zeiten einspeisen, in denen sonst nur wenige Erneuerbare Energien einspeisen können, z.B. bei Windflauten.

Empfehlenswerte Photovoltaik-Batteriespeicher verfügen daher über entsprechende technische Schnittstellen und eine intelligente Ladestrategie, um durch Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch des Stroms das Gesamtsystem zu optimieren.

Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) – empfehlenswert, da netzdienlich	<ul style="list-style-type: none"> • Netzdienliche Batteriespeichersysteme optimieren nicht nur den einzelnen Haushalt, sondern bieten über eine intelligente Ladestrategie eine Einsatzoptimierung zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch von Strom im Gesamtsystem
Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) – eingeschränkt empfehlenswert, da nicht netzdienlich	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht-netzdienliche Batteriespeichersysteme optimieren lediglich den einzelnen Haushalt, bieten jedoch keine Funktion zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch von Strom im Gesamtsystem

Batteriespeichersysteme im EWS-Förderprogramm

Das Öko-Institut hat insgesamt 16 Hersteller von Salzwasser- bzw. Lithium-Eisenphosphat-Batterien befragt. Alle für das EWS-Förderprogramm ausgewählten Batteriespeichersysteme – gefördert werden ausschließlich integrierte Gesamtsysteme, d.h. Batterie inklusive Wechselrichter – erfüllen die folgenden Anforderungen:

Die Batteriespeichersysteme besitzen eine Steuerungssoftware zur Fehlerdiagnose, so dass eine zielgerichtete Analyse von Defekten und Kapazitätseinbußen möglich ist.
Die Batteriespeichersysteme sind zudem so konstruiert, dass einzelne Batteriemodule sowie Elektronikbauteile vom Fachpersonal für Reparaturen oder Recycling leicht entnehmbar bzw. austauschbar sind.
Die Batteriespeichersysteme sind bei Bedarf modular erweiterbar.
Das Gehäuse der Batteriespeichersysteme besteht aus leicht rezyklierbarem Material.
Alle Hersteller stellen Kundeninformationen bezüglich sicherheitsrelevanter Themen zur Verfügung.
Alle Batteriespeichersysteme sind zusätzlich KfW-förderfähig.
Die ins EWS-Förderprogramm aufgenommenen Hersteller von PV-Batteriespeichersystemen haben in ihrer Unternehmensstruktur keine Eigentümer und/oder Investoren der Atom-, Kohle-, Öl- oder Waffenindustrie.

Zur Liste inklusive Kurzprofil der geförderten Batteriespeichersysteme im EWS-Förderprogramm:
<https://www.ews-schoenau.de/unser-foerderprogramm/foerderung-fuer-batteriespeicher-erhalten/>

1. Hintergrund

Die Elektrizitätswerke Schönau Vertriebs GmbH (EWS) besitzen ein eigenes Förderprogramm für ihre Stromkunden, mit denen ökologische, bürgereigene Kraftwerke wie PV-Anlagen und Blockheizkraftwerke ermöglicht sowie Energieeffizienz- und Bürgerenergieprojekte, Bildungs-, Aufklärungsmaßnahmen und Kampagnen zur Energiewende unterstützt werden. Dieses Förderprogramm soll um einen weiteren Baustein ergänzt werden: die Förderung von Batteriespeichern für Privathaushalte, mit denen der Eigenverbrauch des durch Photovoltaikanlagen erzeugten Stroms erhöht werden kann (PV-Batteriespeicher). Für ihr Förderprogramm zu PV-Batteriespeichern möchte die EWS eine Fokussierung auf Speichersysteme und Hersteller, die sich bezüglich Umweltrelevanz und Qualität positiv hervorheben. Vor diesem Hintergrund hat die EWS das Öko-Institut um fachwissenschaftliche Unterstützung bei der Entwicklung von Kriterien und Herstellerempfehlungen für das Förderprogramm zu Photovoltaik-Batteriespeichern angefragt.

Zielsetzung dieser Kurzstudie ist es, auf Basis vorhandener Literatur einen Überblick über die Vor- und Nachteile der verschiedenen am Markt vorhandenen Batterietechnologien zu liefern sowie Kriterien für eine weitergehende Beurteilung zur Aufnahme von Batterieherstellern und -produkten in das Förderprogramm der EWS zu entwickeln.

2. Auswahl der für das EWS-Förderprogramm in Frage kommenden Speichertechnologie(n)

2.1. Am Markt vorhandene Technologien bei Photovoltaik-Batteriespeichern

Der Markt an PV-Batteriespeichern ist vielfältig. Während ursprünglich Bleibatterien die dominierende Technologie war, sind mittlerweile Lithium-Ionen-Batterien am weitesten verbreitet. Laut Solarstromspeicher-Preismonitor Deutschland (Tepper 2016) verteilte sich der Speicherabsatz der für den Monitor befragten Installateure im ersten Drittel des Jahres 2016 zu 94% auf Lithium- und zu 6% auf Bleispeicher, letztere mit weiter sinkenden Marktanteilen. Innerhalb der Lithium-Batteriespeicher gibt es wiederum eine Vielzahl von Elektrolyten und Kombinationen von Elektrodenmaterialien, die sich in ihren Eigenschaften wie Zyklfestigkeit, spezifische Kapazität etc. voneinander unterscheiden. Jenseits der Blei- und Lithiumspeicher sind zudem vereinzelt PV-Batteriespeicher auf Basis von Salzwasser als Elektrolyt, sowie Vanadium-Redox-Flow-Batteriespeicher verfügbar.

Blei-Säure-Akkumulatoren

Bei Blei-Säure-Akkumulatoren bestehen sowohl die negative als auch die positive Elektrode aus Blei bzw. einer Bleilegierung. Als Elektrolyt dient Schwefelsäure, die an der Zellreaktion teilnimmt. Im geladenen Zustand bestehen die positive Elektrode aus Bleidioxid (PbO_2) und die negative aus Blei (Pb). Zusammen mit der Schwefelsäure bildet sich beim Entladen an beiden Elektroden Bleisulfat (PbSO_4), das beim Laden wieder in Bleidioxid bzw. in Blei zurückverwandelt wird.

Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Bei Lithium-Ionen Akkumulatoren enthält die positive Elektrode als Aktivmaterialien Übergangsmetalloxide (Lithium-Kobaltoxid, LCO; Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid, LNCA; Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid, LNMC; Lithium-Manganoxid, LMO) oder Übergangsmetallphosphate (Lithium-Eisenphosphat, LFP).

Die Aktivmaterialien der negativen Elektrode bestehen in der Regel aus Graphit oder anderen kohlenstoffhaltigen Materialien. Neuere Entwicklungen nutzen Nanomaterialien mit Silizium, Zinn, Aluminium oder nanostrukturiertes Lithiumtitanat. So unterscheidet man zum Beispiel bei Lithium-Eisenphosphat-Batterien zwischen C-LFP mit Anode auf Basis einer Graphitstruktur, d.h. Kohlenstoff, sowie LTO-LFP auf Basis von Lithiumtitanoxid (siehe auch Abschnitt 2.3.1). Beim Laden wird Lithium aus der positiven Elektrode entfernt und nach Transport durch den Elektrolyten in die negative Elektrode eingelagert, während beim Entladen der Vorgang in umgekehrter Richtung abläuft (Stahl et al. 2016). Als Elektrolyte werden aufgrund der hohen Reaktivität metallischen Lithiums gegenüber Wasser oder feuchter Luft gemäß (Wohlfahrt-Mehrens o.J.) nur Lösungen wasserfreier Lithiumsalze in organischen Lösemitteln oder Festkörperelektrolyte verwendet.

Gemäß „Marktübersicht Batteriespeicher 2017“ (C.A.R.M.E.N. e.V. 2017) kommen im Bereich der Photovoltaik-Batteriespeicher im Wesentlichen Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (LNMC) und Lithium-Eisenphosphat (LFP) zum Einsatz, so dass im weiteren Verlauf dieser Kurzstudie diese beiden Technologien analysiert werden. Bei den Anodenmaterialien wird laut (Köhler et al. 2017) mehrheitlich Graphit verwendet, welches sich durch geringe Materialkosten auszeichnet.

Salzwasser-Akkumulatoren (Aqueous-Hybrid-Ion, AHI)

Die „Salzwasserbatterie“ wird im Englischen als Aqueous Hybrid Ion (AHI) Battery bezeichnet. Die Kathode besteht aus Lithium-Manganoxid, die Anode aus Kohlenstoff („activated carbon“), der Separator aus Baumwollvlies und der Elektrolyt aus Salzwasser auf Basis von Natrium-Sulfat. Im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Akkus, bei denen ausschließlich Lithium-Ionen den Ladungstransport zwischen Anode und Kathode übernehmen, handelt es sich bei der Salzwasserbatterie gemäß (Württemberg 2014) um ein System, das man als „poly-ionisch“ bezeichnen könnte. Dabei wird die Ladung sowohl von Lithium- als auch von Natrium-Ionen transportiert. Dazu kommen Wasserstoff-Protonen, die bei einem bestimmten Ladezustand entstehen und ebenfalls Ladung transportieren.

Der Batterietyp „Aqueous-Hybrid-Ion“ wurde von dem US-amerikanischen Unternehmen Aquion Energy entwickelt und patentiert. Der Batterietyp von Aquion Energy wurde bis Anfang des Jahres 2017 auch in Deutschland zum Verkauf angeboten. Aquion Energy meldete dann jedoch Insolvenz an; der Bieterprozess wurde Mitte 2017 entschieden; laut (Mayer 2017) hat ein chinesisches Unternehmen den Zuschlag erhalten und Verhandlungen mit dem Österreichischen Unternehmen BlueSky Energy aufgenommen, die bislang europäischer Anbieter der Salzwasser-Batterie waren.

Redox-Flow-Akkumulatoren

Bei Redox-Flow-Batterien befindet sich das Aktivmaterial in der Lösung des wässrigen Elektrolyten, die in zwei separaten Tanks gelagert werden. Für die elektrochemische Reaktion zirkulieren die beiden Flüssigkeiten über Pumpen in zwei getrennten Kreisläufen. Im durchströmten „Reaktor“ kommt es dann zu den Lade- und Entladevorgängen mittels Ionenaustausch über eine Membran. Der Aufbau bei diesem Batterietyp ist durch die Tanks, Pumpen und Leitungen aufwändiger als bei den andern dargestellten Batterien und führt zu höheren Verlusten und einem größeren Wartungsaufwand (Stahl et al. 2016).

Insgesamt spielen Redox-Flow-Batterien derzeit am Markt im Privatbereich, aber auch für andere Anwendungen eine untergeordnete Rolle (Figgner et al. 2017). Laut „Produktdatenbank Batteriespeichersysteme für Photovoltaikanlagen“ (PV Magazine 2017) gibt es derzeit nur einen Hersteller, der PV-Batteriespeicher auf Basis von Vanadium Redox-Flow anbietet. Da diese mit einer Speicherkapazität von 15 kWh tendenziell zu groß für Privathaushalte sind, wird diese Technologie für das geplante EWS-Förderprogramm nicht weiter in Betracht gezogen.

2.2. Allgemeiner Systemvergleich der PV-Batteriespeichertechnologien

Tabelle 2-1: Technischer Vergleich der verschiedenen PV-Speichertechnologien

	Blei	Aqueous Hybrid Ion	Lithium-Ionen (LFP und LNMC)
Kalendarische Lebensdauer	10-20 Jahre (überwiegend 10 Jahre)	15 Jahre	>10 bis >20 Jahre (überwiegend 20 Jahre)
Zyklenlebensdauer	2.500-4.200 Vollzyklen (80% Restkapazität)	3.000 Vollzyklen (70% Restkapazität)	4.000-15.000 Vollzyklen (80% Restkapazität); LFP höher als LNMC
Entladetiefe (Depth of Discharge, DoD)	50-100 % (überwiegend 60%)	100 %	70-100 % (überwiegend 90%)
Wirkungsgrad der Batterie	80-85 %	80-90 %	90-95 %
Volumetrische Energiedichte	60-75 Wh/l	Zwischen 12-24 Wh/l	490-580 Wh/l (LNMC) 160-260 Wh/l (LFP)
Sicherheit	Bei starker Überladung / Überentladung können bleihaltige Partikel freigesetzt werden.	Elektrolyt weder brennbar noch explosiv.	Gefahr des „thermal run- away“; LFP zersetzt sich im Gegensatz zu LNMC nicht unter Sauerstoffentwicklung
Wartungsaufwand	hoch (Ausnahme: ,valve-regulated lead- acid battery', VRLA)	sehr gering	gering bis sehr gering

Quellen: (Doelling 2017); (C.A.R.M.E.N. e.V. 2017); (Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen 2016); (Aquion Energy o.J.a); (BlueSky Energy 2017); (BlueSky Energy o.J.); (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg 2017); (Stahl et al. 2016); (Petersen 2015); (Köhler et al. 2017)

Lebensdauer

Die Lebensdauer einer Batterie wird in der Regel sowohl als kalendarische Lebensdauer in Jahren als auch als zyklische Lebensdauer mit der Zyklenzahl angegeben. Die Zyklenlebensdauer ist die Anzahl der Vollzyklen, also der möglichen Be- und Entladungen, bevor die Kapazität der Batterie auf 80 Prozent der ursprünglichen Gesamtkapazität gesunken ist. Aus dem spezifischen Anwendungsprofil des Haushalts – bei einem Durchschnittshaushalt z.B. ca. 250 Vollzyklen im Jahr – ergibt sich die zu erwartende Lebensdauer in Jahren. Die kalendarische Alterung beschreibt die Alterung durch chemische Zerfallsprozesse. Diese treten auch auf, wenn der Speicher gar nicht in Betrieb ist. Je nach Anwendungsprofil ist der eine oder der andere Parameter für die Lebensdauer bestimmender. (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg 2017)

Die durchschnittliche Lebensdauer der verschiedenen Batterietechnologien beträgt für Bleibatterien 10 Jahre, für die Salzwasserbatterie 15 Jahre und für Lithium-Ionen-Batterien 20 Jahre. Während (Sauer 2013) in seinem Kurzgutachten zum Marktanreizprogramm für dezentrale Speicher insbesondere für PV-Strom die kalendarische Lebensdauer für Bleibatterien noch mit einer Bandbreite von 5 bis 15 Jahren, und für Lithium-Ionen-Batterien mit 5 bis 20 Jahren charakterisierte, zeigt die aktuelle Marktübersicht zu Batteriespeichern der Verbraucherzentrale NRW allerdings, dass sich die Werte mehr und mehr überlappen und es sowohl bei Blei- als auch bei Lithium-Ionen-Batterien Produkte mit einer Lebensdauer zwischen 10 und 20 Jahren gibt. (Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen 2016). Laut (Köhler et al. 2017) hat innerhalb der Lithium-Ionen-Batterien LFP eine deutlich höhere Anzahl an Vollzyklen als LNMC.

Entladetiefe

Die Entladetiefe, auch bezeichnet als Depth of Discharge (DoD), gibt an, wie viel Prozent der Nennkapazität der Batterie genutzt werden kann, ohne dabei die Lebensdauer signifikant negativ zu beeinflussen. Die reale Entladetiefe beeinflusst somit die Batterielebensdauer: eine vollständige Entladung um 100 Prozent könnte sich je nach Batterietechnologie negativ auf die Lebensdauer der Batterie auswirken. (C.A.R.M.E.N. e.V. 2017)

Während bei Salzwasserbatterien die Entladetiefe laut Herstellerangaben (Aquion Energy o.J.a) bis zu 100% nutzbar ist, d.h. sie vollständig entladen werden können, liegt die Entladetiefe bei Lithium-Ionen-Batterien überwiegend bei 90 Prozent. Blei-Säure-Batterien nutzen nach (Figgenger et al. 2017) im Gegensatz dazu typischerweise nur 50 bis 60 Prozent ihrer installierten Kapazität zur Zyklierung, um Alterungsprozesse wie Sulfatierung bei niedrigen Ladezuständen oder Ausfall von Aktivmaterial durch mechanischen Stress zu vermeiden und dadurch akzeptable Lebensdauern zu gewährleisten. Bei gleicher nominaler Speicherkapazität steht Blei-Säure-Batterien somit weniger nutzbare Speicherkapazität zur Verfügung als Lithium-Ionen- oder Salzwasserbatterien. Bei Tiefentladung würde die Lebensdauer von Bleibatterien stark beeinträchtigt, so dass für einen optimierten Betrieb Ladekontrolle und Tiefentladungserkennung erforderlich sind. (Stahl et al. 2016)

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist definiert als die zur Verfügung stehende Energie beim Entladen, dividiert durch die eingespeicherte Energie, das heißt das Verhältnis von gespeicherter zu später wieder abgegebener Energie. Er verdeutlicht somit Leistungsverluste. Unterscheiden muss man zwischen dem Wirkungsgrad der Batterie an sich, wie in Tabelle 2-1 angegeben, und dem Gesamtwirkungsgrad des Stromspeicher-PV-Systems. Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus den einzelnen Teilwirkungsgraden von Batterie, Laderegler und Wechselrichter zusammen. Dabei ergeben sich nach (Weniger et al. 2017) Systemverluste durch der leistungselektronischen Komponenten, den Batteriespeicher und die Systemregelung, d.h. Dimensionierungs- (bedingt durch Leistungsbeschränkungen der Systemkomponenten), Umwandlungs- (durch die Energieumwandlung in den leistungselektronischen Komponenten und im Batteriespeicher), Regelungs- und Energiemanagementverluste sowie Bereitschaftsverluste (durch Leistungsaufnahme der Komponenten, z.B. dem Batteriemanagementsystem, im Leerlauf- oder Standby-Betrieb).

Lithium-Ionen-Batterien weisen mit bis zu 95 Prozent den größten Wirkungsgrad auf. Bei den Bleibatterien ist der Wirkungsgrad mit bis zu 85 Prozent im Vergleich geringer. Der Wirkungsgrad der Salzwasserbatterie liegt mit 80 bis 90 Prozent etwas höher als der von Bleibatterien, ist jedoch geringer als der Wirkungsgrad von Lithium-Ionen-Speichern.

Energiedichte

Die volumetrische Energiedichte der Salzwasserbatterie liegt deutlich unterhalb der üblichen Energiedichten von Blei-Säure- oder Lithium-Ionen-Batterien, welche die höchste Energiedichte aufweisen (innerhalb der Lithium-Ionen-Batterien haben LNMC-Batterien wiederum eine höhere Energiedichte als LFP-Batterien). Bei Salzwasser- und Bleibatterien steigt deshalb gegenüber den derzeit üblichen Lithium-Speichern entweder der Raumbedarf, oder der Kunde muss bei vergleichbarer Größe Abstriche bei der Speicherkapazität in Kauf nehmen.

Sicherheit und Wartung

Bleibatterien sind grundsätzlich wartungsintensiver als Lithium-Ionen-Batterien. Es muss regelmäßig destilliertes Wasser nachgefüllt werden.

Nach (Stahl et al. 2016) ist bei Überladung von Bleibatterien eine Wasserstoffentwicklung zu berücksichtigen. Bei starker Überladung und bei Überentladung kann das Batteriegehäuse versagen, so dass in diesem Fall Schwefelsäure und bleihaltige Partikel freigesetzt werden können (siehe auch Abschnitt 2.3.4 zur Umwelt- und Gesundheitsrelevanz). Die Batterieräume müssen daher ausreichend gut belüftet sein. Empfohlen werden gemäß (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg 2017) eine regelmäßige Spannungsmessung und Temperaturkontrolle sowie insbesondere die Prüfung der ordnungsgemäßen Be- und Entlüftung des Raums. Eine wartungsarme Variante innerhalb der Bleibatterien ist laut (Köhler et al. 2017) eine ventilge-regelte Blei-Säure-Batterie (englisch: ‚valve-regulated lead-acid battery‘, VRLA) mit Überdruckventil und gel-artigem Elektrolyt; ein Nachfüllen von destilliertem Wasser ist bei diesem Batterietyp nicht nötig.

Laut (Umweltbundesamt 2015) sind Lithium-Batterien bei ordnungsgemäßem Umgang allgemein als sicher anzusehen. Dennoch können sich Gefahren durch mechanische Beschädigungen, elektrische Fehler, falsche Ansteuerung (z.B. unkontrollierte Überladung oder Tiefentladung) sowie thermische Einwirkungen ergeben: Durch mechanische Beschädigungen können gasförmige oder flüssige Stoffe austreten, welche stark reizend, brennbar oder sogar giftig sein können (siehe Abschnitt 2.3.4 zur Umwelt- und Gesundheitsrelevanz). Ein elektrischer Fehler, z.B. ein Kurzschluss durch Produktionsfehler, kann zur Überhitzung und zum Brand führen. Auch die äußere Erwärmung einer Lithium-Batterie, z.B. durch Sonneneinstrahlung oder Heizung, kann zum Brand oder zur Explosion führen. Diese Kettenreaktion wird als so genannter „thermal runaway“ bezeichnet.

Innerhalb der unterschiedlichen Lithium-Ionen-Batterietypen gibt es laut Karlsruher Institut für Technologie, KIT, zitiert in (ENBAUSA 2014), keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf die Entflammbarkeit. Die wesentlichen Bestandteile der Lithium-Eisenphosphat-Batterien sind identisch mit den übrigen Lithium-Ionen Batterien. Der Elektrolyt ist in beiden Fällen eine leicht entzündliche organische Flüssigkeit, beziehungsweise bei höheren Temperaturen ein leicht entzündliches Gas, das im Falle eines Brandes in der Regel zunächst brennt. Dasselbe gelte für die Anode, wenn sie bei Lithium-Eisenphosphat-Batterien wie bei den übrigen Lithium-Ionen Batterien aus Kohlenstoff oder Graphit ist und im Brandfall daher eine zusätzliche Brandlast darstellt. Einzig die Kathode von Lithium-Eisenphosphat-Akkus sei weniger brennbar im Vergleich zu anderen Lithium-Ionen Batterien. Nach (Stahl et al. 2016) zersetzt sich LFP bei hohen Temperaturen nicht unter Sauerstoffentwicklung.

Der Recyclingkonzern Umicore¹ stuft – im Falle eines Brandes – kobalthaltige Lithium-Ionen Batterien als problematischer ein als andere Lithium-Ionen Batterien, weil sie im Laufe der Reaktion Sauerstoff freisetzen und damit schwerer zu löschen sind. Zudem sind die Energiedichten bei kobalthaltigen Batterien oft höher. Der thermal runaway setzt zudem häufig auch verzögert ein, also auch in Lagerhallen von Recyclingbetrieben, in denen die Altbatterien zur Weiterbehandlung gelagert werden.

Bei der Salzwasserbatterie besteht die positive Elektrode aus Lithium-Mangan-Oxid (LMO), das sich nach (Stahl et al. 2016) zwar auch bei hohen Temperaturen unter Wärmeentwicklung und Sauerstoffentwicklung zersetzen kann. Die Salzwasser-Batterie gilt gemäß (BlueSky Energy 2017) jedoch als extrem sicher, da das wässrige Elektrolyt weder brennbar noch explosiv ist. Die Salzwasser-Batterie ist laut (BlueSky Energy 2017) zudem absolut wartungsfrei.

¹ Telefonische Mitteilung vom 22.09.2017, Gespräch geführt mit Christian Hagelüken und Frank Treffer (Umicore)

2.3. Ökologische Bewertung der PV-Batteriespeichertechnologien

Eine umfassende ökologische Bewertung der verschiedenen PV-Batteriespeichertechnologien ist aufgrund der verschiedenen Einflussfaktoren äußerst komplex. Da dies im Rahmen dieser Kurzstudie nicht möglich ist, werden die Ergebnisse vorhandener Studien und Veröffentlichungen zusammengefasst. Eine wesentliche Grundlage bildet dabei die Studie des Öko-Instituts im Auftrag des Umweltbundesamtes „Ableitung von Recycling- und Umweltaforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern“ (Stahl et al. 2016).

2.3.1. Materialzusammensetzung

Die folgenden Materialzusammensetzungen von Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batteriespeichern wurden der UBA-Studie „Ableitung von Recycling- und Umweltaforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern“ entnommen (Stahl et al. 2016). Dabei handelt es sich ausschließlich um die Zellmaterialien, d.h. alle Materialien, die für die eigentliche Funktion der Zellen der Batterien relevant sind. Hinzu kommen noch Materialien für die „Infrastruktur“ der Batterien, wie z.B. Aluminium, Kupfer, oder Stahl bzw. Edelstahl, die für das Batteriegehäuse eingesetzt werden, sowie verschiedene Kunststoffe z.B. für Gehäuse, Dichtungen und Separatoren. Bei den Batteriemagementsystemen wird angenommen, dass sie unabhängig von der Batterietechnologie im Wesentlichen aus denselben Materialien bestehen.

Tabelle 2-2: Spezifischer Materialbedarf für Batteriespeichersysteme auf Basis von Blei-Säure und Lithium-Ionen (nur Zellmaterialien)

Elemente (kg/kWh)	Blei-Säure-Batterien		C-LNMC		C-LFP		LTO-LFP	
Al			0,7	14,6%	0,72	15,0%	2,1	17,5%
Co			0,45	9,4%				
Cu			0,77	16,1%	0,85	17,7%	1,5	12,5%
Fe					0,86	17,9%	1,33	11,1%
Li			0,17	3,5%	0,12	2,5%	0,79	6,6%
Mn			0,42	8,8%				
Ni			0,45	9,4%				
P			0,04	0,8%	0,55	11,5%	0,78	6,5%
Pb	26,23	98,2%						
S	0,45	1,7%						
Ti							5,33	44,5%
Graphit			1,63	34,0%	1,56	32,5%		
Ca	0,028	0,1%						
F			0,16	3,3%	0,14	2,9%	0,16	1,3%
	26,71 kg/kWh		4,79 kg/kWh		4,80 kg/kWh		11,99 kg/kWh	

Quelle: (Stahl et al. 2016)

Die Blei-Säure-Batterie besteht aufgrund der Elektroden zu 98 % aus Blei (Aktivmasse: Blei bzw. Bleidioxid; Stromsammel und Ableiter: Bleilegierung). Knapp 2 % entfallen auf den Schwefel der Schwefelsäure als Elektrolyt. Hinzu kommt noch ein sehr geringer Anteil an Calcium.

Bei den Lithium-Batterien sind in Tabelle 2-2 die spezifischen Materialzusammensetzungen von Lithium-Nickel-Mangan-Cobaltoxid (LNMC) und sowie Lithium-Eisenphosphat (LFP) Batterien dargestellt, letztere zum einen mit einer Anode auf Basis einer Graphitstruktur, d.h. Kohlenstoff (C-LFP), sowie auf Basis von Lithiumtitanoxid (LTO-LFP). Hier zeigt sich zum einen, dass die Zusammensetzung der beiden Zellchemien LNMC und LFP unterschiedlich ausfällt und zum anderen, dass Lithium mit ca. drei bis sieben Prozent insgesamt nur einen kleinen Gewichtsanteil der Zellmaterialien ausmacht. Einen wesentlich größeren Gewichtsanteil besitzen die Stromsammel aus Aluminium und Kupfer, sowie die Anoden aus Graphit bzw. Titanoxid.

Bei der Salzwasserbatterie wird als Kathodenmaterial Lithium-Manganoxid verwendet, als Anodenmaterial ein Verbund aus Kohlenstoff („activated carbon“) und $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$. Als Elektrolyt kommt Salzwasser auf Basis von Natriumsulfat zum Einsatz. Die mengenmäßigen Anteile dieser Materialien an der Gesamtbatterie gemäß (Aquion Energy 2015) sind in Tabelle 2-3 dargestellt.

Zu beachten ist, dass sich Gewichtsanteile der Salzwasserbatterien in Tabelle 2-3 auf chemische Verbindungen und die Gesamtbatterie beziehen, während in Tabelle 2-2 ausschließlich chemische Elemente und nur die Batteriezellen betrachtet werden. Ein Vergleich der beiden Tabellen untereinander, zum Beispiel Anteile von Lithium als Element, ist daher nicht möglich.

Tabelle 2-3: Materialzusammensetzung von Salzwasserbatterien (Gesamtbatterie)

Verbindungen	Gewichtsanteil bezogen auf die Gesamtbatterie
Wasser	30-35 %
Proprietäre Alkalisalze, Natriumsulfat (Elektrolyt)	10-20 %
Proprietäres Kohlenstoffpulver (Elektrodenmaterial)	0,5-8 %
Natrium-Lithium-Dititanium-Triphosphat (SLTP)	20-25 %
Natrium-Dititanium-Triphosphat (STP)	Spuren
Lithium-Manganoxid (LMO)	25-30 %
Proprietäre Kunststoffbindemittel	0,5-2 %
Edelstahl	8-10 %

Quellen: (Aquion Energy 2015); {Aquion Energy 2016}

2.3.2. Verfügbarkeit der Rohstoffe

Zur Bewertung der Verfügbarkeit von Rohstoffen (Rohstoffkritikalität) gibt es laut (Stahl et al. 2016) bislang verschiedene methodische Ansätze und Studien, die jeweils für zum Teil sehr unterschiedliche Fragestellungen (z.B. Versorgungssicherheit von Regionen, Versorgungssicherheit von Zukunftstechnologien) und Bezugsräume erstellt wurden. So ergeben sich bei der Auswertung entsprechender Literatur zum Teil sehr unterschiedliche Zahlen zur statistischen Reichweite der Produktions- und Reservemengen von Rohstoffen, da diese von sehr vielen Einflussfaktoren abhängt.

Auf der aktuellen Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017 befinden sich zum Beispiel Kobalt, Phosphor und natürlicher Graphit. Die Rohstoffe auf dieser Liste sind deshalb als kritisch für die EU eingestuft, weil bei ihnen das Risiko eines Versorgungsengpasses und dessen Folgen für die Wirtschaft größer sind als bei den meisten anderen Rohstoffen. (Europäische Kommission 2017)

Laut (Dehoust et al. 2017) hat sich in der methodischen Debatte zur Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen in den letzten Jahren zwar in vielen Bereichen ein Konsens herausgebildet, der insbesondere durch die Verwendung der beiden Dimensionen Versorgungsrisiken (engl.: supply risks) und Vulnerabilität gekennzeichnet ist. Zudem greifen die meisten der aktuelleren Arbeiten auf eine Kombination von Indikatoren zurück, die das Rohstoffangebot und die Rohstoffnachfrage abbilden. Die Bewertungen basieren dabei jedoch überwiegend auf Daten der Ist-Situation und versuchen mit Hilfe dieser Informationen, Aussagen über mögliche Versorgungsrisiken und Vulnerabilitäten in der nahen bzw. mittleren Zukunft zu treffen. Die meisten Kritikalitätsbewertungen stellen somit ausschließlich Methoden zur Abschätzung ökonomischer Risiken dar. Ökologische und soziale Aspekte bei der Rohstoffgewinnung wurden nach (Dehoust et al. 2017) bislang nur von wenigen Arbeiten mit berücksichtigt. Zudem legen vorhandene Studien zur Rohstoffkritikalität zu wenig Augenmerk auf künftige bzw. dynamische Aspekte, z.B. den weiteren Ausbau der Elektromobilität und damit verbundene Nachfrageänderungen, oder veränderte Rohstoffgewinnungspraktiken.

Versorgungsrisiken bestehen unter anderem dann, wenn sich die Produktion und Reserven auf wenige Länder verteilen, und in diesen ggf. noch politische Instabilitäten vorherrschen, während gleichzeitig das Recyclingpotenzial und Wiederverwendung dieser Rohstoffe (siehe Abschnitt 2.3.6) gering ist. Blei stammt zum Beispiel im Wesentlichen aus den Ländern China, Australien und den USA, Bleireserven sind darüber hinaus in Russland vorhanden. Lithiumvorkommen und Reserven verteilen sich im Wesentlichen auf die drei Länder Chile, Australien und China. Bei Kobalt, Bestandteil von LNMC Batterien, stammt nach (Drobe et al. 2014) mehr als die Hälfte der weltweiten Kobaltförderung sowie der Reserven aus der Demokratischen Republik Kongo, bei Graphit ist das wesentliche Produktions- und Reserveland China mit knapp zwei Drittel (Produktion) bzw. drei Viertel (Reserve) Anteil, gefolgt von Indien und Brasilien. Bei Graphit in Batterien kommt alternativ zu bergmännisch gewonnenem Graphit jedoch auch synthetisches Graphit zum Einsatz, das v.a. aus Verbrennungsrückständen von Schweröl gewonnen wird.

2.3.3. Umwelt- und soziale Auswirkungen bei der Primärgewinnung der Rohstoffe

Die Bleiproduktion (Bergbau, Erzaufbereitung, Bleischmelze sowie Bleibatterierecycling) gehört gemäß Jahresbericht 2016 des Blacksmith Instituts zu den am stärksten umwelt- und gesundheitsgefährdenden Prozessen der Welt (Pure Earth & Green Cross Switzerland 2016), was sich jedoch im Wesentlichen auf außereuropäische Länder bezieht.

Die Primärgewinnung von Lithium erfolgt zu einem beträchtlichen Teil aus Salzseen, bislang vorrangig in Chile. Nach (Austen 2015) werden bei der Lithium-Produktion ähnlich wie beim Abbau von Meersalz große Mengen Wasser, in denen der Stoff gelöst ist, in riesige Verdunstungsbecken gepumpt, aus denen das Wasser verdunstet und Lithiumkarbonat hinterlässt.

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Lithium-Batterien, vor allem für die Elektromobilität, kann davon ausgegangen werden, dass auch weitere Vorkommen erschlossen und ausgebeutet werden. Dabei ist besonders zu beachten, dass sich viele dieser Vorkommen in bislang vom Menschen wenig beeinflussten Regionen (Trockengebiete der Hochgebirge) befinden. Gemäß (Süddeutsche Zeitung 2017a) will beispielsweise auch Bolivien zur späteren Produktion von Batterien im großen Stil im Salzsee von Uyuni eine Anlage zum Abbau von Lithium bauen lassen.

In der Kobaltproduktion im Kongo sind nach einer Studie des Öko-Instituts die Arbeitsbedingungen unzureichend: Die Förderung erfolgt zumeist in nicht-registrierten Minen; die Arbeiter arbeiten häufig unter gefährlichen Bedingungen; tödliche Arbeitsunfälle sind an der Tagesordnung. Jährlich sterben mehr als einhundert Menschen durch Hangrutschungen, Schachteinstürze oder Wassereinbrüche. Auch Kinderarbeit ist weit verbreitet beim Abbau des Erzes sowie beim Waschen und Sortieren der geförderten Mineralien (Tsurukawa et al. 2011). Und auch bei der industriellen Gewinnung von Kobalt sind Probleme zu verzeichnen. Laut (Süddeutsche Zeitung 2017b) kam im Rahmen der Enthüllungen um die Paradise Papers ans Licht, dass der im Kongo tätige Abbaukonzern – mutmaßlich mit Hilfe korrupter Praktiken – Konzessionen weit unter Marktwert erhalten hat und dadurch dem Land wertvolle Einnahmen für die Entwicklung entgehen.

2.3.4. Umwelt- und Gesundheitsrelevanz

Elektrochemische Energiespeicher beinhalten zum Teil Chemikalien, die nicht nur beim Abbau und Verarbeitung der Primärmaterialien eine hohe Umweltrelevanz aufweisen (siehe Abschnitt 2.3.3), sondern ihre besondere Schädlichkeit auch in der Nachgebrauchsphase und Entsorgung entwickeln können. Während nach (Stahl et al. 2016) eine Freisetzung der Stoffe beim bestimmungsgemäßen Betrieb des Batteriespeichers weitgehend auszuschließen ist, da sie durch Abkapselung sicher von der Umwelt getrennt werden, wird diese Einkapselung beim Recycling bzw. der Entsorgung entfernt oder zerstört, so dass die gefährlichen Stoffe potenziell frei zugänglich sind und zudem in größeren Mengen vorkommen.

Batteriezellen bestehen aus mehreren Substanzen, die jeweils sehr unterschiedliche Gefahren in Bezug auf Human- und/oder Ökotoxizität, wiederum in jeweils unterschiedlichen Abstufungen aufweisen. Im Folgenden wird die Gefahreneinstufung der wesentlichen Inhaltsstoffe, basierend auf so genannten H-Sätzen, dargestellt. Den H-Sätzen können zudem so genannte „Wirkfaktoren“ zugeordnet werden, die die Schwere der von einem Stoff ausgehenden Schädigung kennzeichnen. Für einen Vergleich von Stoffen hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials bietet der Wirkfaktor eine erste Orientierung. Weitere Details siehe Anhang, Abschnitt 5.3.

Blei-Batterien

Das in Bleibatterien enthaltene Blei (Bleioxid bzw. Bleidioxid) ist als gesundheits- und umweltgefährdend eingestuft, und weist im Vergleich zu den Substanzen der anderen Batterietechnologien die höchsten Wirkfaktoren auf (siehe Abschnitt 5.3). Blei ist sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung. Es schädigt bei längerer oder wiederholter Exposition die Organe, kann Säuglinge über die Muttermilch schädigen, die Fruchtbarkeit beeinträchtigen und das Kind im Mutterleib schädigen. In Blei-Batterien wird zudem Schwefelsäure eingesetzt, eine der stärksten Säuren, die schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden verursachen kann.

Ein Kontakt mit Blei ist während der Herstellung und des Recyclingprozesses prinzipiell möglich, wobei hier sachgerechte und unsachgerechte Verfahren unterschieden werden müssen. Unsachgemäße Praktiken sind beim Batterierecycling insbesondere in vielen Entwicklungs- und

Schwellenländern noch sehr weit verbreitet und führen zum Teil zu extremen Schädigungen von Menschen, vor allem von Arbeitnehmern und Anwohnern, sowie der lokalen Umwelt.

Anders als bei Batterien ist der Einsatz von Blei in Elektro- und Elektronikgeräten bereits bis auf definierte Ausnahmen über die europäische RoHS²-Richtlinie 2011/65/EU verboten. Batterien fallen jedoch nicht unter den Geltungsbereich der RoHS-Richtlinie, sondern unter die Batterierichtlinie 2006/66/EG (EU Batterierichtlinie 2006). In dieser sind für Bleibatterien spezifische Kennzeichnungs- und Recyclinganforderungen festgelegt, um eine hohe stoffliche Verwertung zu erreichen (siehe Abschnitt 2.3.6). Darüber hinaus besagt Artikel 5 der Batterierichtlinie, dass die EU-Mitgliedsstaaten die Forschung und Verbesserung der allgemeinen Umweltverträglichkeit von Batterien während ihres gesamten Lebenszyklus sowie die Entwicklung und das Inverkehrbringen von Batterien fördern sollen, die geringere Mengen gefährlicher Stoffe oder weniger umweltbelastende Stoffe enthalten, insbesondere Ersatzstoffe für unter anderem Blei.

Lithium-Ionen-Batterien

Das in Lithium-Ionen-Batterien eingesetzte Lithium kann bei Berührung mit Wasser Wasserstoff entwickeln, der sich spontan entzünden kann. Die Lösemittel des Elektrolyten sind leicht entzündlich, gesundheitsschädlich bei Verschlucken, verursachen schwere Augenreizung und können die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition schädigen. Das im Elektrolyt enthaltene Leitsalz (LiPF₆) ist giftig bei Verschlucken, verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden und schädigt die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition durch Einatmen. Graphit ist nicht als Gefahrstoff klassifiziert. Kommt dagegen für die negative Elektrode Lithiumcarbonat zum Einsatz, so ist dieses gesundheitsschädlich bei Verschlucken und verursacht schwere Augenreizung. Neben diesen Inhaltsstoffen, die in allen Lithium-Batterien verwendet werden, unterscheiden sich die Batterien im Wesentlichen durch das positive Aktivmaterial:

- LNM-C-Batterien: Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid als positives Aktivmaterial verursacht Lebensgefahr beim Einatmen; zudem schädigt es die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition und kann schädlich für Wasserorganismen sein mit langfristiger Wirkung. Darüber hinaus haben einige Unternehmen die Substanz klassifiziert mit der Gefahr allergischer Hautreaktionen sowie dem Verdacht auf Krebs erzeugung. Die Wirkfaktoren dieser Gefahreinstufung sind im Vergleich zur Blei-Säure-Batterie niedriger, jedoch höher im Vergleich zu den in LFP-Batterien und in der Salzwasserbatterie verwendeten Substanzen.
- LFP-Batterien: Für Lithium-Eisenphosphat als positives Aktivmaterial gibt es keine Klassifizierung als Gefahrstoff.

Salzwasserbatterien

Bei Salzwasserbatterien ist der Elektrolyt gemäß (Aquion Energy 2016) auf Wasserbasis und enthält Natriumsulfat, das nicht als Gefahrstoff klassifiziert ist. Als Kathodenmaterial wird Lithium-Manganoxid (LMO) verwendet; für die im Sicherheitsdatenblatt der Salzwasser-Batterie (Aquion Energy 2015) angegebene so genannte Identifikationsnummer CAS kann gemäß (ECHA 2017) kein Eintrag gefunden werden. Eine alternative CAS-Nummer für Lithium-Mangan-Oxid ist nach (ECHA 2017) gesundheitsschädlich bei Verschlucken bzw. Einatmen und kann für Wasserorganismen schädlich sein, mit langfristiger Wirkung. Gemäß der im Sicherheitsdatenblatt der Salzwasser-Batterie (Aquion Energy 2015) angegebenen Identifizierungsnummer basiert das verwendete Graphit auf „Carbon black“, das vermutlich Krebs erzeugen kann.

² RoHS: Restriction of Hazardous Substances, d.h. Beschränkung von gefährlichen Stoffen

2.3.5. Treibhausgasemissionen

Zwar gibt es verschiedene Literaturstellen, die Abschätzungen der Treibhausgasemissionen bei der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Batteriespeichern vornehmen. Die Ergebnisse aus der Literatur zeigen jedoch große Abweichungen und sind aufgrund der verschiedenen zugrunde gelegten Rahmenbedingungen (z.B. Anwendung als stationäre Speicher oder im Bereich der Elektromobilität) und getroffenen Annahmen (z.B. unterschiedliche funktionelle Einheit oder Umgang mit Datenlücken) wenig vergleichbar. Für Salzwasserbatterien gibt es bislang keine Studien zu den Treibhausgasemissionen.

Bezogen auf die Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus müssen jenseits des Aufwandes für die Herstellung weitere Aspekte in Betracht gezogen werden. So sind bei Bleibatterien im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien die Entladetiefe und der Wirkungsgrad deutlich geringer. Dies wirkt sich bei vergleichbarer nominaler Kapazität effektiv auf die nutzbare Kapazität aus, die bei Lebenszyklusanalysen als funktionelle Einheit dienen sollte, und die bei Lithium-Ionen-Batterien entsprechend höher ist. Da man Lithium-Ionen-Batterien um 90 Prozent entladen kann, Bleibatterien aber nur zu 50 bis 60 Prozent, so muss man für eine vergleichbare Nutzkapazität eine fast doppelt so große Bleibatterie kaufen. Hinzu kommt bei Bleibatterien eine geringere Zyklenlebensdauer, so dass innerhalb eines üblichen Nutzungszeitraums einer Photovoltaik-Anlage von zwanzig Jahren eine Bleibatterie typischerweise einmal ersetzt werden muss.

2.3.6. Recycling

Ein umfassendes Recycling ist im Hinblick auf Ressourcenschonung und Reduzierung der Umweltauswirkungen über den Lebenszyklus unerlässlich. Es trägt maßgeblich zu einer längeren Nutzung der Ressourcen bei. In Bezug auf Batterien beinhaltet es zunächst das Zerlegen des Gehäuses und im Anschluss die Zerlegung auf Modul- und Zellebene in die einzelnen Rohstoffe. Die Rückgewinnung der Metalle beinhaltet mechanische, pyrometallurgische und hydrometallurgische Verfahren (Stahl et al. 2016).

Blei-Säure-Batterien

Nach (Stahl et al. 2016) gibt es für Blei-Säure-Batterien in Industrieländern wie Deutschland eine etablierte Recycling-Infrastruktur. Bei einer gemäß EU Batterierichtlinie 2006/66/EG für Blei-Säure-Batterien vorgegebenen Mindest-Recyclingeffizienz von 65 Prozent des durchschnittlichen Gewichts der Batterie wurden laut (Umweltbundesamt 2017) und (BMUB 2017) in den Jahren 2015 und 2016 sogar durchschnittliche Recyclingeffizienzen³ von rund 85 Prozent erzielt. Es gibt in Deutschland ansässige Hersteller von Bleibatterien, die eigene Metallhütten besitzen und Rücknahme sowie das fachgerechte Recycling der Batterien garantieren (Hoppecke 2016).

Zum Vergleich: Kommen Blei-Säure-Batterien in Schwellen- und Entwicklungsländern als stationäre Stromspeicher (zum Beispiel im Rahmen der dezentralen Elektrifizierung ländlicher Räume) oder mobile Anwendungen (zum Beispiel als Starterbatterie in Fahrzeugen) zum Einsatz, so bestehen dort noch erhebliche Umwelt- und Gesundheitsprobleme durch unangemessene Recyclingpraktiken (Stahl et al. 2016); so wird das Blei ohne jegliche Schutzmaßnahmen eingeschmolzen und die Säure wird z.T. unkontrolliert abgegossen. Die betroffenen Arbeiter und Anwohner sind somit extremen Bleibelastungen ausgesetzt, die schon nach wenigen Monaten zum Tod führen können (Manhart et al. 2016); (Manhart & Schleicher 2015).

³ Die Recyclingeffizienz eines Recyclingverfahrens erhält man, indem die Masse der zurückgewonnenen Sekundärrohstoffe (Outputfraktionen) zur Masse der Altbatterien, die dem Verfahren zugeführt wurde (Inputfraktionen), ins Verhältnis gesetzt wird. (Umweltbundesamt 2017)

Lithium-Ionen-Batterien

Gemäß (Buchert & Sutter 2016) gibt es im Gegensatz zu anderen Metallen wie Aluminium oder Kupfer, bei denen Recyclingprozesse seit vielen Jahrzehnten etabliert sind, bisher bei Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland noch keine signifikante Rückgewinnung des Lithiums. Aus technischer Sicht kann das Lithium aus den Batterien zwar recycelt werden. Das Lithium geht in die Schlacke und liegt dann in sehr ähnlicher Form vor wie bei Lithium-Festgesteinslagerstätten (die z.B. in Australien abgebaut werden). Aufgrund des hohen Aufwandes der Rückgewinnung von Lithium aus der Schlacke ist ein solches Recycling jedoch nur bei vergleichsweise hohen Lithium-Preisen (wie z.B. im Herbst 2017) wirtschaftlich tragfähig.

Gemäß (Stahl et al. 2016) kann davon ausgegangen werden, dass unter der Annahme einer stark steigenden Lithiumnachfrage künftig auch Lithiumquellen mit höherem Aufwand erschlossen werden müssen, z.B. durch geringere Konzentrationen in den Salzseen, und/oder durch eine Ausweitung des Bergbaus. Bei steigender Nachfrage nach Lithium, aber auch durch das künftige Vorhandensein größerer Mengen an Altbatterien wird erwartet, dass das Recycling von Lithium ökonomisch interessant bleibt. Allerdings sind solche vereinfachten Prognosen – wie sehr oft im Bereich der Rohstoffwirtschaft – mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet.

Innerhalb der Lithium-Ionen-Batterien sind LNMC-Batterien für Recyclingbetriebe interessanter als LFP-Batterien. Kobalt und Nickel werden zurückgewonnen, da diese aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv sind. Nach (Stahl et al. 2016) werden die Recyclingeffizienzen³ der Zellen von Lithium-Ionen-Akkus wie folgt grob geschätzt: 70 Prozent für Lithium, jeweils 95 Prozent für Kobalt, Nickel und Mangan, sowie 80 Prozent für Kupfer und 50 Prozent für Aluminium; Titan und Graphit werden nicht zurückgewonnen.

Lithium-Ionen-Batterien fallen gemäß EU Batterierichtlinie 2006/66/EG unter „Sonstige Batterien“, für die eine Mindest-Recyclingeffizienz von 50 Prozent des durchschnittlichen Gewichts bezogen auf die Gesamtbatterie vorgegeben ist. (EU Batterierichtlinie 2006)

Salzwasserbatterien

Eine unabhängige Untersuchung zum Recycling von Salzwasserbatterien gibt es derzeit nicht. Gemäß Cradle to Cradle® Zertifikat erreicht die Batterie einen Kreislauffähigkeitsindex zwischen ≥ 50 und < 65 Prozent (in die Berechnung fließen der prozentuale Anteil des Produktes, der recycelbar ist sowie der prozentuale Anteil an Recyclingmaterial im Produkt ein, siehe Abschnitt 2.3.7). Laut Eigenauskunft von BlueSky Energy in der Herstellerbefragung im Rahmen dieses Vorhabens (siehe Abschnitt 4) ist die Batterie inklusive der Batteriezellen vollständig recycelbar. Gemäß (Aquion Energy o.J.b) können die mechanischen Materialien in normalen Recyclinganlagen recycelt werden, die flüssigen Bestandteile können sicher und ohne spezielle Ausrüstung entsorgt werden.

Nach Einschätzung der AutorInnen dieser Studie muss die Herstellerangabe zur vollständigen Recycelbarkeit relativiert werden: Vollständig recycelbar bedeutet nicht, dass die Batterien unter derzeitigen technologischen, wirtschaftlichen und logistischen Bedingungen auch tatsächlich vollständig recycelt werden, sollten sie als Altprodukte zur Entsorgung anfallen. Denn bei vielen Materialien und Verbundwerkstoffen sind zwar Recyclingtechnologien erforscht und damit theoretisch anwendbar, im derzeitigen wirtschaftlichen Umfeld aber vielfach nicht darstellbar. Im Hinblick auf die Materialzusammensetzung der Salzwasserbatterie (siehe Tabelle 2-3) kann davon ausgegangen werden, dass der Edelstahlanteil vollständig recycelt wird. Wasser (einschließlich der gelösten Salze) kann über konventionelle industrielle Verfahren aufbereitet werden. Das Recycling von Kohlenstoffpulver aus Batterien wird derzeit nicht im industriellen Maßstab praktiziert.

Bei Natrium-Lithium-Dititanium-Triphosphat (SLTP) und Lithium-Manganoxid (LMO) handelt es sich um Spezialmaterialien die ggf. in Anlagen zum Recycling anderer lithiumhaltigen Batterien aufbereitet werden können (zur Rückgewinnung von Lithium und wahrscheinlich unter Verlust der anderen Bestandteile). In wie weit dieser Recyclingstrom wirtschaftlich ist und von Industrieakteuren in Zukunft implementiert wird, konnte im Rahmen des Projektes nicht geklärt werden.

2.3.7. Cradle to Cradle® Zertifikat der Salzwasserbatterie

Die Produktlinien Aquion Aspen Battery 24S und 48S der Firma Aquion Energy besitzen das Zertifikat „Cradle to Cradle® Certified“, das bis Juni 2018 gilt. (Cradle to Cradle Products Innovation Institute o.J.). Gemäß (OmniCert Umweltgutachter GmbH o.J.) beurteilt das Cradle to Cradle® Zertifikat die Verwendung sicherer und gesunder Materialien und Rohstoffe, den sorgfältigen Umgang mit Wasser und Energie, die Rohstoffwiederverwendung sowie soziale Verantwortung. Innerhalb der fünf Kategorien (siehe Tabelle 2-4) gibt es jeweils fünf mögliche Stufen der Zertifizierung (Basic-Level als Grundvoraussetzung, sowie darüber hinaus alternativ Bronze, Silber, Gold oder Platin). Die Cradle to Cradle® Einstufung der Aquion Aspen Battery in den einzelnen Kategorien ist in Tabelle 2-4 dargestellt, die daraus resultierende Cradle to Cradle® Gesamtbewertung ist „Bronze“.

Eine detaillierte Bewertung des Cradle to Cradle® Zertifikats für die Salzwasserbatterie konnte im Rahmen der vorliegenden Kurzstudie nicht durchgeführt werden.

Tabelle 2-4: Einstufung der Aquion Aspen Salzwasserbatterie nach Cradle to Cradle®

Cradle to Cradle® Kategorien	Einstufung der Aquion Aspen Battery	Erfüllte Anforderungen in den jeweiligen Kategorien gemäß Einstufung der Aquion Aspen Battery
Material Gesundheit	Bronze-Level	<p>Basic-Level: Unter Einbeziehung der Lieferkette wird eine Bestandsaufnahme aller Inhaltsstoffe erstellt, damit diese auf ihre toxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften hin bewertet werden können. Alle Inhaltsstoffe eines Produktes müssen bekannt sein, d.h. alle Chemikalien sind anhand ihrer Chemical Abstracts Service-Nummer (CAS-Nr.) identifiziert. Das Produkt enthält keine Substanzen der „Banned List“ - die verbotene Chemikalienliste.</p> <p>Bronze-Level: Mehr als 75 Prozent der Inhaltsstoffe des Produktes werden anhand der C2C-Chemikalienbewertung akzeptiert. Eine Strategie um „X“ bewertete Substanzen im vorliegenden Fall zu ersetzen wird entwickelt.</p>
Material Wieder- verwendung	Silber-Level	<p>Basic-Level: Produkte werden so entworfen, dass ihre Bestandteile als Teil des technischen Kreislaufs recycelt werden können. Die Kreislauffähigkeit des Produktes wird mittels eines „Kreislauffähigkeitsindex“ veranschaulicht:</p> $\frac{\% \text{ Anteil des Produktes welches recycelbar ist} \cdot 2 + \% \text{ Anteil Recyclingmaterial im Produkt}}{3} \cdot 100\%$ <p>Silber-Level: Kreislauffähigkeitsindex ≥ 50</p>
Erneuerbare Energien	Bronze-Level	<p>Basic-Level: Der Energieverbrauch als Ganzes und der Anteil erneuerbarer Energien innerhalb der Produktion werden erfasst. Jährlicher Stromverbrauch und direkte Vor-Ort-Emissionen, die mit der Endfertigung des Produkts verbunden sind, werden quantifiziert.</p> <p>Bronze-Level: Strategie zur Nutzung von erneuerbaren Energien und ein Kohlenstoff-Managementplan sind entwickelt.</p>

Cradle to Cradle® Kategorien	Einstufung der Aquion Aspen Battery	Erfüllte Anforderungen in den jeweiligen Kategorien gemäß Einstufung der Aquion Aspen Battery
Wasser-management	Platin-Level	<p>Basic-Level: Das Unternehmen verpflichtet sich zu Grundsätzen über einen verantwortungsvollen Umgang mit Wasser. Wassermanagement und Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität sollen für die Bewertung in dieser Kategorie so etabliert werden, dass schließlich die Wasserqualität nach der Nutzung besser ist als vor der Nutzung. Der Hersteller hat keine signifikante Verletzung der Abwasser-Einleitungsgenehmigung in den letzten zwei Jahren begangen. Lokale und geschäftsspezifische Wasserprobleme sind definiert (zum Beispiel stellt der Hersteller fest, ob Wasserknappheit ein Problem ist und ob sensible Ökosysteme gefährdet sind). Eine Strategie zum Wassermanagement ist erstellt, in dem Maßnahmen zur Minderung der identifizierten Probleme aufgenommen wurden. Bei Rezertifizierung wird der Fortschritt dargelegt.</p> <p>Platin-Level: Wasser, welches die Produktionsanlage verlässt, erfüllt Trinkwasserqualitätsstandards</p>
Soziale Verantwortung	Bronze-Level	<p>Basic-Level: Der Hersteller verpflichtet sich zu sozialen Grundsätzen und lässt dies ggf. (abhängig vom Zertifizierungslevel) durch Dritte bestätigen. Ein kurzes Audit wurde selbst durchgeführt, um die Einhaltung der Menschenrechte zu bewerten. Eine Strategie ist vorhanden, in der Maßnahmen zur Linderung der identifizierten Probleme konkretisiert sind.</p> <p>Bronze-Level: Ein vollständiges, umfassendes Audit wurde selbst durchgeführt. Eine Strategie, basierend auf den UN Global Compact Tool oder B-Corp, ist entwickelt.</p>

Quellen: (OmniCert Umweltgutachter GmbH o.J.); (Cradle to Cradle Products Innovation Institute o.J.)

2.4. Zusammenfassende Empfehlung: Auswahl der grundsätzlich für das EWS-Förderprogramm in Frage kommenden Speichertechnologie(n)

Alle der im Rahmen der Kurzstudie analysierten PV-Batteriespeichertechnologien haben jeweils spezifische Vor-, aber zum Teil auch Nachteile, d.h. keine der Batterietechnologien ist in allen untersuchten Bereichen vorteilhaft.

Im Folgenden wird dargestellt, welche PV-Batteriespeicher-Technologien für das EWS-Förderprogramm vorgeschlagen (Tabelle 2-5) bzw. nicht empfohlen werden (Tabelle 2-6).

Tabelle 2-5: Zur Aufnahme in das EWS-Förderprogramm vorgeschlagene Batterietechnologien

Salzwasser-Batterien	<ul style="list-style-type: none"> · Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Die in den Batteriezellen enthaltenen Substanzen sind überwiegend nicht als Gefahrstoffe für Umwelt oder Gesundheit klassifiziert bzw. besitzen im Vergleich zu den anderen Batterietechnologien vergleichsweise niedrige Wirkfaktoren. – <u>Sicherheit</u>: Der wässrige Elektrolyt ist weder brennbar noch explosiv. Die Batterie ist laut Hersteller wartungsfrei. – <u>Entladetiefe</u>: bis zu 100 Prozent. – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad</u>: Höher als beim Durchschnitt der Blei-Säure-Batterien. · Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad</u>: Niedriger als beim Durchschnitt der Lithium-Batterien. – <u>Volumetrische Energiedichte</u>: Sehr niedrig (d.h. steigender Raumbedarf oder geringere Speicherkapazität).
Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP)	<ul style="list-style-type: none"> · Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Das positive Aktivmaterial LFP ist nicht als Gefahrstoff für Umwelt und Gesundheit klassifiziert. – <u>Sicherheit</u>: Innerhalb der Lithium-Batterien besitzen LFP-Batterien eine geringere Energiedichte; bei hohen Temperaturen zersetzt sich LFP nicht wie LNMC unter zusätzlicher Sauerstoffentwicklung. – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad</u>: Sehr hoch; Anzahl Vollzyklen bei LFP- etwas höher als bei LNMC-Batterien. · Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Leitsalz und Lösemittel des Elektrolyten sind, wie bei LNMC-Batterien, als Gefahrstoffe für Umwelt und Gesundheit klassifiziert, allerdings mit niedrigeren Wirkfaktoren im Vergleich zu den Substanzen der Blei-Säure-Batterie. – <u>Sicherheit</u>: Gefahr des „thermal runaway“.

Quelle: Öko-Institut e.V.

Tabelle 2-6: Batterietechnologien, die nicht zur Aufnahme ins EWS-Förderprogramm vorgeschlagen werden

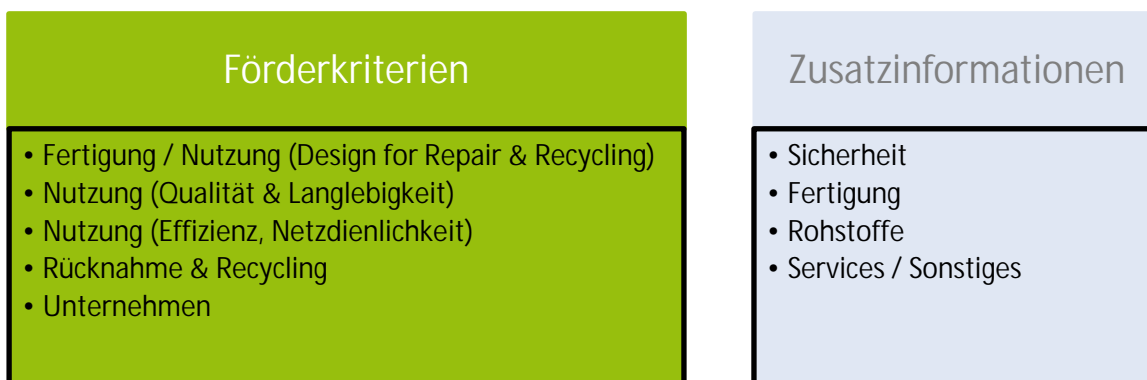
Lithium-Mangan-Kobalt-Oxid-Batterien (LNMC)	<ul style="list-style-type: none"> · Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Das positive Aktivmaterial LNMC ist als Gefahrstoff für Umwelt und Gesundheit mit relativ hohen Wirkfaktoren klassifiziert. Auch Leitsalz und Lösemittel des Elektrolyten sind, wie bei LFP-Batterien, als Gefahrstoffe für Umwelt und Gesundheit klassifiziert, allerdings mit niedrigeren Wirkfaktoren im Vergleich zu den Substanzen der Blei-Säure-Batterie. – <u>Sicherheit</u>: Gefahr des „thermal runaway“. Innerhalb der Lithium-Batterien besitzen LNMC-Batterien eine höhere Energiedichte; bei hohen Temperaturen wird im Laufe der Reaktion Sauerstoff freigesetzt, so dass diese Batterien schwerer zu löschen sind. – <u>Rohstoffe</u>: Kobalt ist als „kritischer Rohstoff“ eingestuft mit dem Risiko von Versorgungsengpässen für die EU. Die Primärgewinnung im Kongo erfolgt unter unzureichenden Arbeitsbedingungen. · Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad</u>: Sehr hoch – <u>Recycling</u>: Innerhalb der Lithium-Batterien sind LNMC-Batterien interessanter für Recyclingbetriebe; Kobalt und Nickel sind aktuell aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv und werden zurückgewonnen.
Bleibatterien	<ul style="list-style-type: none"> · Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Die in den Batteriezellen enthaltenen Substanzen sind als Gefahrstoffe für Umwelt oder Gesundheit klassifiziert und besitzen im Vergleich zu den anderen Batterietechnologien die höchsten Wirkfaktoren. – <u>Rohstoffe</u>: Die Primärgewinnung von Blei in außereuropäischen Ländern zählt zu den am stärksten umwelt- und gesundheitsgefährdenden Prozessen der Welt. – <u>Lebensdauer, Wirkungsgrad und Entladetiefe</u>: Im Vergleich zu den anderen Batterietechnologien am niedrigsten. – <u>Volumetrische Energiedichte</u>: Niedrig (d.h. steigender Raumbedarf oder geringere Speicherkapazität). – <u>Wartungsaufwand</u>: Hoch (Ausnahme: VRLA-Typ, d.h. „valve regulated lead-acid battery“) · Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Recycling</u>: Etablierte Recycling-Infrastruktur in Industrieländern wie Deutschland, mit hohen Recyclingeffizienzen.

Quelle: Öko-Institut e.V.

3. Weitergehende Kriterien zur Beurteilung der Aufnahme von spezifischen PV-Batteriespeichern in das EWS-Förderprogramm

Ergänzend zur zusammenfassenden Empfehlung der grundsätzlich in Frage kommenden Speichertechnologien (siehe Abschnitt 2.4), hat das Öko-Institut weitergehende ökologische Kriterien entwickelt, nach denen die Aufnahme spezifischer PV-Batteriespeicher in das EWS-Förderprogramm beurteilt werden kann. Dabei handelt es sich um Förderkriterien, die in die Bewertung der Systeme einfließen, sowie weitere Kriterien, die den EWS-Stromkunden als Zusatzinformationen zur Verfügung gestellt werden, siehe Abbildung 3-1. Die Kriterien werden im Folgenden näher erläutert.

Abbildung 3-1: Kriterien zur Beurteilung der Aufnahme von spezifischen PV-Batteriespeichern in das EWS-Förderprogramm



Quelle: Öko-Institut e.V.

Fertigung / Nutzung (Design for Repair & Recycling)

Um mögliche Reparaturen bzw. ein sachgerechtes Recycling der Batteriesysteme zu erleichtern und den Rohstoffaufwand über den gesamten Lebenszyklus zu verringern, sind bereits bei der Fertigung bestimmte Designaspekte sinnvoll. So ist es von Vorteil, wenn sich mit Hilfe einer Software auslesen lässt, in welcher spezifischen Zelle ein möglicher Defekt steckt, so dass bei Reparatur- und Wartungsmaßnahmen eine aufwändige Prüfung entfällt und die Dokumentation hilft, defekte und/oder geschwächte Zellen zu identifizieren und gezielt einzeln zu entnehmen anstatt die ganze Einheit auswechseln zu müssen. Bei einer Anbindung ans Internet ist eine solche Qualitäts- und Sicherheitsüberprüfung auch remote möglich.

Zudem vereinfacht eine Konstruktion ohne feste Verbauung, Verklebung oder Verschweißung erforderliche Reparaturen bzw. das Recycling. So können bei Bedarf einzelne Batteriemodule sowie die Elektronikbauteile ohne signifikante Umbauten am Gesamtgerät vom Fachpersonal entnommen und ausgewechselt werden.

Nutzung (Qualität & Langlebigkeit)

PV-Batteriesysteme mit einer hohen Qualität und langen Lebensdauer schonen vergleichsweise die Inanspruchnahme von Ressourcen, da bei kurzlebigeren oder frühzeitig defekten PV-Batterien in einem Betrachtungszeitraum von z.B. zwanzig Jahren der Aufwand für die Herstellung einer oder mehrerer neuer Batterien hinzukommt.

Abgefragt werden diesbezüglich Informationen zur voraussichtlichen Lebensdauer der Batterie (Anzahl an Vollzyklen bei 80% Restkapazität), der maximalen Entladetiefe, das Angebot von Garantien für die Batteriesysteme sowie das Angebot eines Wartungs- und Reparaturservices durch den Hersteller.

Nutzung (Effizienz)

Technische Angaben der Hersteller zur Effizienz von Batteriespeichersystemen (z.B. Wirkungsgrad, Leistungsaufnahme im Leerlauf, Standby und ausgeschaltetem Zustand etc.) sollten auf einem einheitlichen Messverfahren beruhen, um die Daten verschiedener Hersteller untereinander besser vergleichen zu können. Hersteller, die ihre Batteriesysteme nach dem BVES/DSW Solar „Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme“⁴ prüfen lassen, tragen zu einer Verbesserung der Transparenz und Vergleichbarkeit von Daten bei.

Nutzung (Netzdienlichkeit)

Die Investition von privaten Haushalten in dezentrale Photovoltaik-Batteriespeicher erfolgt meist aus wirtschaftlichen Gründen. Batteriespeicher können den Eigenverbrauch des Stroms aus der eigenen Photovoltaik-Anlage erhöhen und somit kann der Strombezug aus dem Netz reduziert werden. Maßgeblich für den wirtschaftlichen Vorteil ist die Differenz zwischen der PV-Einspeisevergütung und dem Endkundenstrompreis. Dabei stellt sich die Frage, ob diese aus Einzelverbrauchersicht bestehende Optimierungslogik zur Maximierung des Eigenverbrauchs auch einen Nutzen für die Energiewende im Gesamtsystem darstellen kann.

Momentan existieren im deutschen Stromsystem kaum Stunden, in denen die Erzeugung aus Erneuerbaren Energien die Nachfrage übersteigt (mit Ausnahme von Netzengpässen, die jedoch weniger von der PV-Einspeisung als von der Wind-Einspeisung abhängig sind). Insofern kann zu den meisten Zeitpunkten die Netzeinspeisung des PV-Stroms die Stromerzeugung aus fossilen Kraftwerken (meistens Steinkohlekraftwerke) ersetzen. Wird dieser Strom jedoch in den eigenen Batteriespeicher eingespeichert, so ist je nach Gesamtwirkungsgrad des Speichersystems aufgrund von Dimensionierungs-, Umwandlungs-, Regelungs- und Energiemanagement- sowie Bereitschaftsverlusten bis zur Ausspeicherung mit Verlusten von zum Teil mehr als 10 bis 20 Prozent zu rechnen. Dieser aus Sonnenenergie gewonnene Strom geht verloren und kann nicht zur Verdrängung von Strom aus fossiler Erzeugung beitragen. Vor diesem Hintergrund ist es im Sinne der Energiewende im Gesamtsystem wichtig, dass Batteriespeicher zukünftig nicht nur zur Eigenverbrauchsoptimierung eingesetzt werden. Mögliche Einsatzfelder mit direktem Nutzen für die Energiewende sind:

- Einsatzoptimierung zur Entlastung des lokalen Verteilnetzes bei Auslastungsspitzen
- Einsatzoptimierung zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch von Strom im Gesamtsystem

Die Summe der dezentralen Batterien zusammen sollte helfen die Fluktuation der Erneuerbaren Energien auszugleichen. Dabei kann es zwei Zielsetzungen geben: Die lokale Netzentlastung oder die Einspeisung von Elektrizität zu Zeiten, in denen nur wenige Erneuerbare Energien einspeisen können (z.B. bei Windflauten). Eine alleinige Optimierung auf Haushaltsebene kann ggf. sogar kontraproduktive Auswirkungen haben. Aus diesem Grund sollten bei der Investition in einen PV-Batteriespeicher die entsprechenden technischen Schnittstellen, die eine System-gerichtete Steuerung ermöglichen, berücksichtigt werden.

⁴ Siehe http://www.bves.de/wp-content/uploads/2017/04/Effizienzleitfaden_V1.0.4_April2017.pdf

Mit Hilfe eines Stromspeichers kann die PV-Anlage beispielsweise dadurch netzdienlich betrieben werden, dass Erzeugungsspitzen zu Mittagszeiten vermieden werden. Wird die Batterie im Tagesverlauf zu früh voll aufgeladen, so muss die Leistung der PV-Anlage zur Einhaltung der geforderten 50%-Einspeisegrenze trotz Direktverbrauch und Speichereinsatz gedrosselt werden, und der potentiell immer noch zur Verfügung stehende Solarstrom kann nicht mehr genutzt werden. Daher bedarf es einer vorausschauenden Planung der Batterieladung im Tagesverlauf, die sich durch ein prognose-basiertes Energiemanagement umsetzen lässt. Das Ziel solch einer prognosebasierten Batterieladepaltung ist es, die PV-Energie erst um die Mittagszeit zu speichern, um die geforderte maximale Einspeiseleistung einzuhalten und somit eine Abregelung zu vermeiden. (Tjaden et al. 2016)

Aus diesem Grund sind für das EWS-Förderprogramm daher Kriterien bezüglich vorhandener Schnittstellen zur externen, stetigen Leistungsansteuerung sowie die Möglichkeit einer netzdienlichen bzw. wetterbasierten Ladestrategie der PV-Batteriespeichersysteme von Relevanz.

Rücknahme fürs Recycling

Stromspeicher, die in Verbindung mit Photovoltaikanlagen in privaten Haushalten eingesetzt werden, unterliegen der Europäischen Batterierichtlinie 2006/66/EG, die in Deutschland durch das Batteriegesetz vom 25.06.2009 in nationales Recht umgesetzt ist. Darin sind Batterien, die in Zusammenhang mit Photovoltaikanlagen genutzt werden, als "Industriebatterien" klassifiziert; sie dürfen nicht in Deponien oder durch Verbrennung beseitigt werden. Hersteller und Inverkehrbringer von Industriebatterien müssen zwar registriert werden und müssen Altbatterien unentgeltlich zurücknehmen. Anders als für „Gerätebatterien“, bei denen die EU-Mitgliedsstaaten Mindestsammelquoten von derzeit 45 Prozent erfüllen müssen, gibt die Richtlinie von 2006 jedoch keine konkreten Sammelziele für Industriebatterien vor⁵. Demnach haben Hersteller bis dato keine rechtliche Verpflichtung, die Sammlung von Altbatterien aktiv zu fördern (mit Ausnahme einiger Mindestanforderungen wie die Kennzeichnung der Batterie mit einer durchgestrichenen Mülltonne etc.).

Aus Ressourcensicht ist wichtig, dass die Altbatterien einem sachgerechten Recycling zugeführt werden. Aus Verbrauchersicht ist es darüber hinaus wichtig zu wissen, ob und wie eine kostenfreie, unbürokratische und umweltfreundliche Abholung und Entsorgung der Altbatterien aus den Haushalten vonstattengeht (z.B. ob die Rücknahme generell, oder nur bei gleichzeitiger Neuanschaffung eines Batteriesystems kostenfrei ist).

Seit Mitte 2015 gibt es für stationäre elektrische Energiespeicher, die in Photovoltaik-Anlagen oder sonstigen Anwendungen im Bereich der erneuerbaren Energien zum Einsatz kommen, auf freiwilliger Basis ein gemeinsames Branchenrücknahmesystem, für das die Gemeinsame Rücknahmesystem Servicegesellschaft (GRS) mbH zuständig ist. Die Vertreiber dieser Speicher, wie zum Beispiel Elektrohandwerksbetriebe, sind zwar weiterhin verpflichtet, die ausrangierten Modelle von ihren Kunden, d.h. den privaten und gewerblichen Endnutzern, unentgeltlich entgegenzunehmen, jedoch entfällt für die Vertreiber dann der organisatorische und finanzielle Aufwand, diese individuell den jeweiligen Herstellern zurückkommen zu lassen, die laut Gesetz für die Entsorgung verantwortlich sind. Durch die Schaffung des Rücknahmesystems sei sichergestellt, dass im Auftrag der Herstellergemeinschaft alle zurückgenommenen Systeme beim Vertreiber abgeholt und einer ordnungsgemäßen Verwertung zugeführt werden. (BSW 2015)

⁵ Anmerkung: Derzeit findet eine Evaluierung der EU Batterierichtlinie 2006/66/EG statt. Zukünftige Änderungen zu Mindestzielen für die Sammlung und strengere Vorgaben für Recyclingeffizienzen von Industriebatterien können zumindest nicht ausgeschlossen werden.

Unternehmen

Voraussetzung, um in das Förderprogramm der EWS aufgenommen zu werden, ist, dass die Hersteller der zur Förderung empfohlenen PV-Batteriespeichersysteme in ihrer Unternehmensstruktur keine Eigentümer und/oder Investoren der Atom-, Kohle-, Öl- oder Waffenindustrie haben. Darüber hinaus ist es wünschenswert, dass die Unternehmen sich durch weitere Aktivitäten im Bereich Nachhaltigkeit engagieren.

Sicherheit

Lithium-basierte Batteriesysteme können bei Fehlbehandlung (physische Belastung, falsch gesteuerte Lade- und Entladezyklen o.ä.) „thermisch durchgehen“ (engl. "thermal run-away“) und Brände auslösen (siehe auch Abschnitt 2.2). Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hat 2014 festgestellt, dass manche stationären PV-Batteriespeichersysteme beim Transport und im Betrieb zum Teil nicht den erforderlichen Sicherheitsstandards entsprechen. Das KIT hat aus diesem Grund eine Kurz-Checkliste⁶ „Li-Ionen Heimspeicher“ entwickelt, die Installateure und Kunden bei der Auswahl und Überprüfung der Sicherheit von Photovoltaik-Speichern unterstützen kann. (KIT 2014)

Es gibt verschiedene Ansätze, die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien positiv zu beeinflussen. Grundvoraussetzung ist gemäß (Fraunhofer ISE 2016) eine hohe Qualität der Zelle und des verwendeten Batteriemanagementsystems sowie ein effizientes thermisches Management. Derzeit fehlen noch einheitliche, nachprüfbar Kriterien, um die Leistungsfähigkeit und Sicherheit von Heimspeichersystemen auf Basis von Lithium-Ionen-Batterien zu beurteilen. Das Fraunhofer ISE erarbeitet aktuell in einem Forschungsprojekt einen Sicherheitsleitfaden für Lithium-Ionen Heimspeicher sowie Empfehlungen für Hersteller, Normengremien und Behörden (Fraunhofer ISE 2016)

Es muss sichergestellt werden, dass Risiken aufgrund von Fehlbehandlung durch entsprechende Vorkehrungen sowie eine Sensibilisierung der Nutzer möglichst reduziert werden, indem die Kunden auf sicherheitsrelevante Themen hingewiesen werden (z.B. Notwendigkeit zur Vermeidung physischer Belastungen sowie großer Hitze, Nässe, Vermeidung unsachgemäßer Umbauten und Reparaturen. Zudem sollten die Batteriesysteme eine Vorrichtung (z.B. Schließmechanismus) besitzen, die Reparatur- und Modifikationsversuche am Gerät durch Laien erschwert bzw. unmöglich macht, um unbefugten Zugriff auf sensible Bauteile (Elektronik, Batteriemodule) deutlich zu erschweren, da Reparatur- oder Modifikationsversuche durch Laien mit hoher Wahrscheinlichkeit negative Auswirkungen auf die Gerätequalität und Sicherheit hätten.

Fertigung

Ein späteres sachgerechtes Recycling der Batteriesysteme wird unter anderem dann erleichtert, wenn bereits bei der Fertigung darauf geachtet wird, dass zum Beispiel das Gehäuse⁷ des Batteriesystems aus leicht rezyklierbarem Material besteht, d.h. kein Verbundwerkstoff, sondern idealerweise ein einzelnes, leicht rezyklierbares Polymer (z.B. ABS, PS) verwendet wird ohne Beimengung von Flammenschutzmitteln. Bei metallischen Gehäusen sollte auf Kunststoffbeschichtungen verzichtet werden.

⁶ Siehe https://www.kit.edu/downloads/KIT_Li-Ionen_Checkliste.pdf

⁷ Allgemein sollte eine möglichst hohe Recyclingeffizienz des Batteriesystems erreicht und insbesondere wichtige Batteriematerialien zu einem möglichst hohen Prozentsatz wiedergewonnen werden, siehe Abschnitt 2.3.6. Der Fragebogen an die Hersteller fokussiert hier jedoch zunächst auf eine recyclinggerechte Fertigung des Gehäuses.

Hinzu kommt, dass PVC in vielen Recyclingströmen problematisch ist, da im mittleren Temperaturbereich Dioxin- und Furanbildung einsetzt. Eine solche Generierung von Schadstoffen kann zwar durch effektive Prozesssteuerung vermieden werden, im Sinne des Vorsorgeprinzips ist dennoch eine PVC-freie Konstruktion (d.h. PVC-freie Kabelummantelungen) zu empfehlen.

Während die Fertigung von Batteriezellen ein weitgehend automatisierter Prozess unter Reinraumbedingungen ist, erfordert der Zusammenbau der Batterien (Verdrahtung der Zellen, Einbau von Zellen und Elektronik in ein Gehäuse, Funktionalitätstests etc.) teilweise manuelle (Fließband-) Arbeit. Insbesondere, wenn solche Prozesse in Niedriglohnländer ausgelagert sind, sollte geprüft werden, ob die wesentlichen Arbeitsstandards (Gesundheit & Sicherheit, lokal geltende Mindestlöhne, ILO Kernarbeitsnormen) eingehalten werden. Zur vertieften Prüfung kann das Kriteriendokument von SA8000 zu Hilfe genommen werden. Die Hersteller der Batteriesysteme werden daher danach gefragt, ob sie mit ihren Herstellern der Komponenten (z.B. Batterie, Wechselrichter etc.) in direktem Kontakt stehen und dabei soziale und ökologische Themen adressieren, ob eine Risikoanalyse zu besonders relevanten Aspekten (z.B. Gesundheit & Sicherheit am Arbeitsplatz, ILO Kernarbeitsnormen) durchgeführt wurde und ggf. darauf aufbauend Maßnahmen zur Reduzierung von Risiken und Problemen eingeleitet wurden.

Rohstoffe

Im Sinne der OECD Due Diligence Guidance zu Konfliktrohstoffen (BMW 2014) sind alle Unternehmen dazu aufgerufen, auf freiwilliger Basis mögliche menschenrechtliche Risiken in den Rohstofflieferketten zu identifizieren und – im Rahmen ihrer Möglichkeiten – Maßnahmen zur Verringerung der Risiken zu ergreifen. Zumeist wird dieses Verfahren auf die Rohstoffe Zinn, Tantal, Wolfram und Gold angewendet. Es ist davon auszugehen, dass für Lithium-Eisenphosphat-Batterien vor allem Zinn relevant ist, das in der Regel in Loten eingesetzt wird. Die Hersteller der Batteriesysteme werden danach gefragt, ob sie das Konzept der angemessenen Sorgfaltspflicht für ihre Rohstofflieferketten anwenden.

Service / Sonstiges

Sind Batteriesysteme modular nachrüstbar, so kann die Kapazität der Batterie bei potenziell steigendem Stromverbrauch des Haushalts, z.B. durch künftige zusätzliche Einbindung von Elektrofahrzeugen, einfach durch zusätzliche Batteriemodule erweitert werden, ohne dass das vorhandene Batteriesystem komplett vorzeitig gegen ein größeres System ausgetauscht werden muss. Dies spart den Einsatz von Ressourcen.

Sind die Batteriesysteme KfW-förderfähig⁸, so können Verbraucher beim Erwerb des PV-Batteriespeichers noch bis zum 31.12.2018 einen zinsgünstigen Kredit der KfW und einen Tilgungszuschuss aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMW) beantragen.

Von Interesse für die Verbraucher kann zudem sein, ob die Batteriespeichersysteme über weitere Funktionen verfügen, zum Beispiel, ob sie Smart-Home-fähig oder Notstrom-fähig sind (Unterbrechungsfreie Stromversorgung, USV), oder ob der Hersteller eine Dimensionierungs- und/oder Wirtschaftlichkeitsberatung für den anzuschaffenden Batteriespeicher anbietet.

Die Hersteller werden schließlich gefragt, ob sie für ihre Batteriesysteme eine Zertifizierung bezüglich Nachhaltigkeit besitzen oder anstreben.

⁸ Siehe auch: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-\(275\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-(275)/)

4. Aufnahme von spezifischen PV-Batteriespeichersystemen in das EWS-Förderprogramm

Auf Basis der in Abschnitt 3 dargestellten Kriterien hat das Öko-Institut einen Fragebogen entwickelt (siehe Anhang 5.1) und im Oktober 2017 insgesamt 16 Hersteller (siehe Anhang 5.2) von Salzwasser- sowie Lithium-Eisenphosphat-Batterien angeschrieben. Elf Hersteller haben Interesse an dem EWS-Förderprogramm gezeigt und den Fragebogen während der Laufzeit dieses Vorhabens ausgefüllt zurückgesendet.

Gefördert werden ausschließlich integrierte Gesamtsysteme, d.h. Batterie inklusive Wechselrichter. Alle für das EWS-Förderprogramm ausgewählten Batteriespeichersysteme erfüllen die folgenden Anforderungen:

Die Batteriespeichersysteme besitzen eine Steuerungssoftware zur Fehlerdiagnose, so dass eine zielgerichtete Analyse von Defekten und Kapazitätseinbußen möglich ist.
Die Batteriespeichersysteme sind zudem so konstruiert, dass einzelne Batteriemodule sowie Elektronikbauteile vom Fachpersonal für Reparaturen oder Recycling leicht entnehmbar bzw. austauschbar sind.
Die Batteriespeichersysteme sind bei Bedarf modular erweiterbar.
Das Gehäuse der Batteriespeichersysteme besteht aus leicht rezyklierbarem Material.
Alle Hersteller stellen Kundeninformationen bezüglich sicherheitsrelevanter Themen zur Verfügung.
Alle Batteriespeichersysteme sind zusätzlich KfW-förderfähig.
Die ins EWS-Förderprogramm aufgenommenen Hersteller von PV-Batteriespeichersystemen haben in ihrer Unternehmensstruktur keine Eigentümer und/oder Investoren der Atom-, Kohle-, Öl- oder Waffenindustrie.

Zur weiteren Differenzierung innerhalb der Lithium-Eisenphosphat-Speicher hat die EWS in ihrem Förderprogramm einen Schwerpunkt auf LFP-Batterien gelegt, die bei der Anwendung das Kriterium „Netzdienlichkeit“ erfüllen (Details siehe Abschnitt 3):

Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) – empfehlenswert, da netzdienlich	<ul style="list-style-type: none"> Netzdienliche Batteriespeichersysteme optimieren nicht nur den einzelnen Haushalt, sondern bieten über eine intelligente Ladestrategie eine Einsatzoptimierung zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch von Strom im Gesamtsystem
Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) – eingeschränkt empfehlenswert, da nicht netzdienlich	<ul style="list-style-type: none"> Nicht-netzdienliche Batteriespeichersysteme optimieren lediglich den einzelnen Haushalt, bieten jedoch keine Funktion zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch von Strom im Gesamtsystem

Hinweis: Die endgültige Auswahl der zu fördernden Hersteller bzw. PV-Batteriesysteme liegt in der Verantwortung der EWS. Dies gilt auch für Erweiterungen oder Kürzungen der zu Beginn des Förderprogramms bestehenden Liste der geförderten Batteriespeichersysteme, zum Beispiel auf Basis von Informationen, die erst nach dem Ende dieses Vorhabens zur Verfügung gestellt werden.

Die Liste der geförderten Batteriespeichersysteme im EWS-Förderprogramm kann eingesehen werden unter

<https://www.ews-schoenau.de/unser-foerderprogramm/foerderung-fuer-batteriespeicher-erhalten/>

5. Anhang

5.1. Fragebogen an die Hersteller von PV-Batteriespeichersystemen

Hintergrund

Die Elektrizitätswerke Schönau Vertriebs GmbH (EWS) besitzen ein eigenes Förderprogramm für ihre Stromkunden, mit denen ökologische, bürgereigene Kraftwerke wie PV-Anlagen und Blockheizkraftwerke ermöglicht sowie Energieeffizienz- und Bürgerenergieprojekte, Bildungs-, Aufklärungsmaßnahmen und Kampagnen zur Energiewende unterstützt werden⁹.

Dieses Förderprogramm soll nun um einen weiteren Baustein ergänzt werden: die Förderung von Batteriespeichern, mit denen der Eigenverbrauch des durch Photovoltaikanlagen erzeugten Stroms erhöht werden kann (PV-Batteriespeicher).

Gefördert werden sollen PV-Batteriesysteme (integriertes Gesamtsystem inkl. Wechselrichter) für Privathaushalte auf Basis von Lithium-Eisenphosphat (LFP) mit mindestens 5.000 Vollzyklen (80% Restkapazität), sowie auf Basis von Salzwassertechnologie.

Für ihr Förderprogramm zu PV-Batteriespeichern möchte die EWS eine Fokussierung auf Speichersysteme und Hersteller, die sich bezüglich Umweltrelevanz und Qualität positiv hervorheben. Vor diesem Hintergrund hat die EWS das Öko-Institut beauftragt, Hersteller der grundsätzlich in Frage kommenden Batteriesysteme anzuschreiben und zur Bewertung einer möglichen Aufnahme ins EWS-Förderprogramm weitere Kriterien aus den folgenden Bereichen abzufragen:

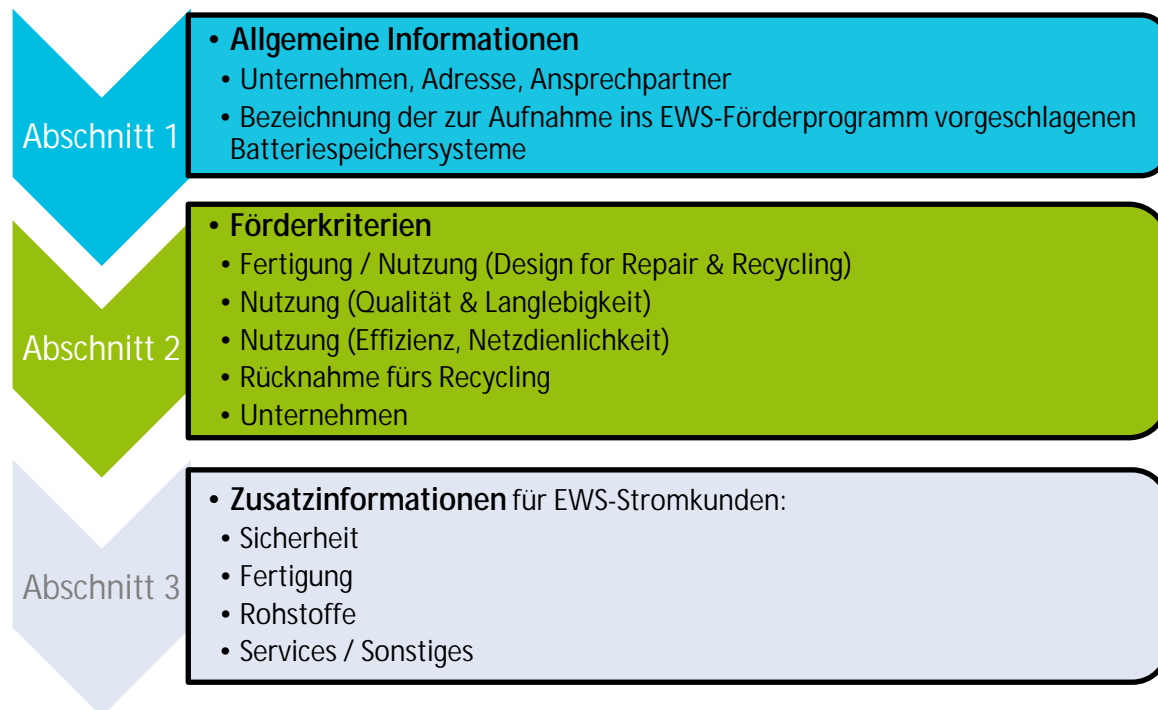


Abbildung 5-1: Gliederung des Fragebogens zu PV-Batteriespeichersystemen

Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie Interesse an einer Aufnahme Ihrer PV-Batteriesysteme in das Förderprogramm der EWS hätten und uns die folgenden Fragen beantworten.

⁹ Details: siehe <https://www.ews-schoenau.de/unser-foerderprogramm/>

Abschnitt 1: Allgemeine Informationen

Allgemeine Informationen	
Unternehmen (Adresse, Web)	
Rechtsform des Unternehmens	
KMU (ja/nein)?	
Kontaktperson (Name, Position, Email, Tel.nr.) für Rückfragen zum Fragebogen	

Bezeichnung der PV-Batteriesysteme, die von Ihnen für die Aufnahme ¹⁰ in das EWS-Förderprogramm vorgeschlagen werden, auf die die von Ihnen gelieferten Informationen des Fragebogens zutreffen.	
Bezeichnung / Nennkapazität	Link zum Datenblatt

Auf welchem Weg können Stromkunden der EWS Ihre PV-Batteriesysteme im Falle der Aufnahme ins EWS-Förderprogramm beziehen?

¹⁰ Gefördert werden sollen PV-Batteriesysteme (integriertes Gesamtsystem inkl. Wechselrichter) für Privathaushalte auf Basis von Lithium-Eisenphosphat (LFP) mit mindestens 5.000 Vollzyklen (80% Rest-kapazität), sowie auf Basis von Salzwassertechnologie.

Abschnitt 2: Fragen zu Förderkriterien**Fertigung / Nutzung (Design for Repair & Recycling)**

Hintergrund: Bei Batteriesystemen ist es von Vorteil, wenn man mit einer Software auslesen kann, in welcher spezifischen Zelle ein möglicher Defekt steckt, so dass man nicht mehr aufwändig prüfen muss, was kaputt ist. Bei Reparatur- und Wartungsmaßnahmen kann eine solche Dokumentation helfen, defekte und/oder geschwächte Zellen einfach zu identifizieren und gezielt einzelne Bauteile zu entnehmen anstatt die ganze Einheit auswechseln zu müssen. Bei einer Anbindung ans Internet ist eine solche Qualitäts- und Sicherheitsüberprüfung auch remote möglich.

Dokumentiert die Steuerungssoftware Ihres PV-Batteriesystems die Lade- und Entladevorgänge der einzelnen Batteriemodule und Zellen, sodass eine softwaregesteuerte und zielgerichtete Analyse von Defekten und Kapazitätseinbußen möglich ist? Bitte kurze Beschreibung.

Ist Ihr Batteriespeichersystem so konstruiert, dass einzelne Batteriemodule sowie die Elektronikbauteile bei Bedarf von Fachpersonal entnommen und ausgewechselt werden können, ohne dass dafür signifikante Umbauten am Gesamtgerät erfolgen müssen (keine feste Verbauung / Verklebung / Verschweißung im Gerät)?

Nutzung (Qualität & Langlebigkeit)

Bitte benennen Sie für die zur Aufnahme ins EWS-Förderprogramm vorgeschlagenen Batteriesysteme die Anzahl an Vollzyklen (80% Restkapazität) und die maximale Entladetiefe (DoD).

Bieten Sie für die zur Aufnahme ins Förderprogramm vorgeschlagenen Batteriesysteme Garantien an? Wenn ja, welche (z.B. Produkt- / Leistungs- / Zeitwertersatzgarantie) und welcher Garantiezeitraum? Falls vorhanden, bitte Link zu den Garantiebedingungen angeben.

Bieten Sie als Hersteller / Inverkehrbringer von Batteriesystemen Ihren Kunden einen Wartungs-/Reparaturservice an? Wenn ja, bitte kurze Beschreibung.

Nutzung (Effizienz, Netzdienlichkeit)

Haben Sie Ihre Batteriesysteme nach dem BVES/BSW Solar „Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme“¹¹ prüfen lassen bzw. planen Sie eine Prüfung? Wenn ja, bis wann ist diese Prüfung voraussichtlich abgeschlossen?

Besitzen Ihre zur Aufnahme ins Förderprogramm vorgeschlagenen Batteriesysteme Schnittstellen zur externen, stetigen Leistungsansteuerung? Wenn ja:

- Welches Protokoll wird verwendet?
- Gibt es eine Dokumentation zu der Kommunikationsschnittstelle inkl. einer Beispielimplementierung?
- Welcher Bereich der stetigen Steuerung (z.B. von 0-100% oder 0, 50%-100%) ist zugelassen?

Bietet Ihr System die Möglichkeit einer netzdienlichen / wetterbasierten Ladestrategie? Wenn ja, beschreiben Sie bitte das Verfahren.

Hintergrund: Stromspeicher bieten die Möglichkeit PV-Anlage netzdienlich zu betreiben und z.B. Erzeugungsspitzen zu Mittagszeiten zu vermeiden. Hierbei kann die PV-Wirkleistungseinspeisung deutlich reduziert werden bei gleichzeitiger Vermeidung von Abregelungsverlusten. Dies stellt einen wichtigen Baustein zum weiteren PV-Ausbau dar.

Rücknahme fürs Recycling

Hintergrund: Stromspeicher, die in Verbindung mit Photovoltaikanlagen in privaten Haushalten eingesetzt werden, unterliegen der Europäischen Batterierichtlinie (2006/66/EG), die in Deutschland durch das Batteriegesetz vom 25.06.2009 in nationales Recht umgesetzt ist. Darin sind Batterien, die in Zusammenhang mit Photovoltaikanlagen genutzt werden, als "Industriebatterien" klassifiziert. Hersteller und Inverkehrbringer von Industriebatterien müssen zwar registriert werden und müssen Altbatterien unentgeltlich zurücknehmen (auch Altbatterien anderer chemischer Zusammensetzung), die Richtlinie gibt aber keine konkreten Sammelziele für Industriebatterien vor. Demnach haben Hersteller derzeit keine rechtliche Verpflichtung, die Sammlung von Altbatterien *aktiv* zu fördern (mit Ausnahme einiger Mindestanforderungen wie die Kennzeichnung der Batterie mit einer durchgestrichenen Mülltonne etc.).

Weisen Sie als Hersteller / Inverkehrbringer von Batteriesystemen Ihre Kunden (insbesondere Endkunden) jenseits einer durchgestrichenen Mülltonne aktiv auf die Notwendigkeit einer korrekten Entsorgung von Altbatterien hin? Wenn ja, wie?

¹¹ Siehe http://www.bves.de/wp-content/uploads/2017/04/Effizienzleitfaden_V1.0.4_April2017.pdf

Unterhalten Sie als Hersteller / Inverkehrbringer von Batteriesystemen ein eigenes Rücknahmesystem für Altgeräte/Batterien oder beteiligen sich an einem Rücknahmesystem (z.B. Stiftung "Gemeinsames Rücknahmesystem"), das eine kostenfreie, unbürokratische und umweltfreundliche Entsorgung von Altbatterien aus privaten Haushalten ermöglicht (inkl. kostenfreier Abholung der Altgeräte / Batterien)? Bitte kurze Beschreibung.

Bsp.: kostenfreie Rücknahme bei gleichzeitiger Neuinstallation eines Batteriesystems; kostenfreie Rücknahme (inkl. Abholung) losgelöst von Neuanschaffung/Neuinstallation inkl. aktiver Kommunikation (Benutzerhandbuch, Webseite, Aufdruck auf Gerät o.ä.)

Ihr Unternehmen

**Warum passen Sie als Batterieanbieter ins Förderprogramm der EWS und deren Leitlinien?
Bitte kurze Beschreibung.**

Gibt es in Ihrer Unternehmensstruktur Eigentümer und/oder Investoren der Atom-, Kohle-, Öl- oder Waffenindustrie?

Abschnitt 3: Zusatzinformationen für die Stromkunden der EWS

Sicherheit

Hintergrund: Lithium-basierte Batteriesysteme können bei Fehlbehandlung (physische Belastung, falsch gesteuerte Lade- und Entladezyklen „thermisch durchgehen“ (Engl. "thermal run-away“) und Brände auslösen. Es muss sichergestellt werden, dass diese Risiken durch entsprechende Vorkehrungen sowie eine Sensibilisierung der Nutzer möglichst reduziert werden.

In welcher Form weisen Sie die Kunden auf sicherheitsrelevante Themen hin (z.B. Notwendigkeit zur Vermeidung physischer Belastungen sowie großer Hitze, Nässe, Vermeidung unsachgemäßer Umbauten und Reparaturen)? Bitte kurze Beschreibung.

Besitzt das Gerät eine Vorrichtung (z.B. Schließmechanismus), die Reparatur- und Modifikationsversuche am Gerät durch Laien erschwert bzw. unmöglich macht?
 (Ein solcher Mechanismus soll unbefugten Zugriff auf sensible Bauteile (Elektronik, Batteriemodule) deutlich erschweren, da Reparatur- oder Modifikationsversuche durch Laien mit hoher Wahrscheinlichkeit negative Auswirkungen auf die Gerätequalität und Sicherheit hätten.)

Fertigung

Besteht das Gehäuse Ihres Batteriesystems aus leicht rezyklierbarem Material?
 Dies bedeutet: Keine Verwendung von Verbundwerkstoffen, idealerweise Verwendung eines einzelnen, leicht rezyklierbaren Polymers ohne Beimengungen von Flammschutzmittel (z.B. ABS, PS).
 Bei Verwendung eines metallischen Gehäuses: Vermeidung von Kunststoffbeschichtungen.

Ist die Verkabelung Ihres Batteriesystems frei von PVC?

Hintergrund: PVC ist in vielen Recyclingströmen problematisch, da im mittleren Temperaturbereich Dioxin- und Furanbildung einsetzt. Eine solche Generierung von Schadstoffen kann zwar durch effektive Prozesssteuerung vermieden werden, im Sinne des Vorsorgeprinzips ist designseitig dennoch eine PVC-freie Konstruktion zu empfehlen (zumal PVC-freie Kabelummantelungen verfügbar sind).

Stehen Sie als Hersteller / Inverkehrbringer der Batteriesysteme mit Komponentenherstellern (z.B. Batterie, Wechselrichter etc.) in direktem Kontakt und adressieren dabei soziale und ökologische Themen? Wenn ja, wie und in welcher Intensität?

Falls ja: Wurde dabei eine Risikoanalyse zu besonders relevanten Aspekten durchgeführt (z.B. Gesundheit & Sicherheit am Arbeitsplatz, ILO Kernarbeitsnormen)? Bitte beschreiben Sie kurz den Ansatz und die Ergebnisse

Falls ja: Wurden darauf aufbauend Maßnahmen zur Reduzierung von Risiken und Problemen eingeleitet? Bitte beschreiben Sie kurz den Ansatz und die Ergebnisse.

Hintergrund: Während die Fertigung von Batteriezellen ein weitgehend automatisierter Prozess unter Reinraumbedingungen ist, erfordert der Zusammenbau der Batterien (Verdrahtung der Zellen, Einbau von Zellen und Elektronik in ein Gehäuse, Funktionalitätstests...) teilweise manuelle (Fließband-) Arbeit. Insbesondere wenn solche Prozesse in Niedriglohnländer ausgelagert sind, sollte geprüft werden, ob die wesentlichen Arbeitsstandards (Gesundheit & Sicherheit, lokal geltende Mindestlöhne, ILO Kernarbeitsnormen) eingehalten werden. Zur vertieften Prüfung kann das Kriteriendokument von SA8000 zu Hilfe genommen werden.

Rohstoffe

Hintergrund: Im Sinne der OECD Due Diligence Guidance zu Konfliktrohstoffen sind alle Unternehmen dazu aufgerufen, auf freiwilliger Basis mögliche menschenrechtliche Risiken in den Rohstofflieferketten zu identifizieren und – im Rahmen ihrer Möglichkeiten – Maßnahmen zur Verringerung der Risiken zu ergreifen. Zumeist wird dieses Verfahren auf die Rohstoffe Zinn, Tantal, Wolfram und Gold angewendet. Es ist davon auszugehen, dass für LiFePO₄ hier vor allem Zinn relevant ist, das i.d.R. in Loten eingesetzt wird.

Wenden Sie als Hersteller / Inverkehrbringer von Batteriesystemen das Konzept der angemessenen Sorgfaltspflicht für Ihre Rohstofflieferketten (Engl.: Supply-chain due diligence) an? Wenn ja: Bitte beschreiben Sie, welche Maßnahmen Sie ergreifen.

Service / Sonstiges

Sind die von Ihnen zur Aufnahme ins Förderprogramm vorgeschlagenen Batteriesysteme modular nachrüstbar, z.B. bei steigendem Stromverbrauch durch zusätzliche Einbindung von E-Fahrzeugen?

--

Wird für Ihre zur Aufnahme ins Förderprogramm vorgeschlagenen Batteriesysteme eine Zertifizierung bezüglich Nachhaltigkeit / Recycling angestrebt (z.B. Cradle-to-cradle)?

--

Welche weiteren Services bieten Sie für die zur Aufnahme ins Förderprogramm vorgeschlagenen Batteriespeichersysteme an? (Beispiele: Dimensionierungs-/ Wirtschaftlichkeitsberatung/ -tools, Notstromfähig/ USV, Smart-Home-fähig...

--

Ist das von Ihnen zur Aufnahme ins Förderprogramm vorgeschlagenen Batteriesysteme KfW-förderfähig?

--

5.2. Alphabetische Übersicht der angeschriebenen Hersteller von Salzwasser- und Lithium-Eisenphosphat-Batterien

1. Alpha ESS Europe GmbH
2. ASD Automatic Storage Device GmbH
3. AutarcTech GmbH
4. BlueSky Energy GmbH
5. EFT-Systems GmbH
6. Energy Depot GmbH
7. Fenecon GmbH
8. Fronius International GmbH
9. Hoppecke GmbH
10. Hycube Technologies GmbH
11. Kostal Solar Electric GmbH
12. PEUS-Testing GmbH
13. Q3 Energy GmbH & Co. KG
14. RCT Power GmbH
15. Solutronic Energy GmbH
16. Varta Storage GmbH

5.3. Gefahreneinstufung der Inhaltsstoffe verschiedener Batterietechnologien

Die Eigenschaften gefährlicher Stoffe werden weltweit einheitlich durch so genannte H-Sätze gekennzeichnet („hazard phrases“), die einen ersten Eindruck von dem mit dem Stoff verbundenen Gefahrenpotenzial geben. Die in den folgenden Tabellen enthaltenen H-Sätze sind der Datenbank der Europäischen Chemikalienagentur ECHA entnommen (ECHA 2017).

Den H-Sätzen im Bereich Gesundheitsgefahren (H300-Reihe) und Umweltgefahren (H400-Reihe) können nach (Oltmanns & Bunke 2016) und (Bunke & Graulich 2003) zudem so genannte „Wirkfaktoren“ zugeordnet werden, die die Schwere der von einem Stoff ausgehenden Schädigung kennzeichnen¹². Dieser Wirkfaktor kann Werte zwischen 1 und 50.000 annehmen; je höher der Schweregrad der möglichen Schädigung, desto höher ist der Wirkfaktor. Für einen Vergleich von Stoffen hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials bietet der Wirkfaktor eine erste Orientierung.

Tabelle 5-1: Gefahreneinstufung der Inhaltsstoffe von Blei-Säure-Batterien

Inhaltsstoffe	CAS-Nr.	H-Sätze / Gefahren	Wirkfaktor
Blei / Bleilegierungen (Pb)	7439-92-1	· H360FD Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen.	1.000
Bleioxid (PbO)	1317-36-8	· Kann das Kind im Mutterleib schädigen.	
Bleioxid (PbO ₂)	1309-60-0	· H362 Kann Säuglinge über die Muttermilch schädigen.	100
		· H372 Schädigt die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition	500
		· H410 Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung	50.000
Schwefelsäure	7664-93-9	· H314 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.	100

Quelle: (ECHA 2017)

Tabelle 5-2: Gefahreneinstufung der Inhaltsstoffe von LNMC / LFP-Batterien

Inhaltsstoffe	CAS-Nr.	H-Sätze / Gefahren	Wirkfaktor
LNMC Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (LiNiMnCoO ₂)	346417-97-8	· H330 Lebensgefahr bei Einatmen	1.000
		· H372 Schädigt die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition	500
		· H412 Schädlich für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung	50
		· H317 Gefahr allergischer Hautreaktionen	500
		· H351 Verdacht auf Krebserzeugung	100
LFP Lithiumeisenphosphat (LiFePO ₄)	15365-14-7	· Keine	-
Lithiumhexafluorophosphat (LiPF ₆)	21324-40-3	· H301 Giftig bei Verschlucken	100
		· H314 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden	100

¹² Für die physikalischen Gefahren (H200-Reihe) werden keine Wirkfaktoren zugeordnet.

Inhaltsstoffe	CAS-Nr.	H-Sätze / Gefahren	Wirkfaktor
		<ul style="list-style-type: none"> H372 Schädigt die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition durch Einatmen 	500
Ethylencarbonat (C ₃ H ₄ O ₃)	96-49-1	<ul style="list-style-type: none"> H302 Gesundheitsschädlich bei Verschlucken H319 Verursacht schwere Augenreizung H373 Kann die Organe schädigen bei längerer oder wiederholter Exposition 	10 50 50
Diethylcarbonat (C ₅ H ₁₀ O ₃)	105-58-8	<ul style="list-style-type: none"> H226 Flüssigkeit und Dampf entzündbar 	-
Dimethylcarbonat (C ₃ H ₆ O ₃)	616-38-6	<ul style="list-style-type: none"> H225 Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar 	-
Graphit bzw. Carbon (C)	7440-44-0 7782-42-5	<ul style="list-style-type: none"> Keine 	-
Lithiumcarbonat (CLi ₂ O ₃)	7439-93-2	<ul style="list-style-type: none"> H302 Gesundheitsschädlich bei Verschlucken H319 Verursacht schwere Augenreizung 	10 50

Quelle: (ECHA 2017)

Tabelle 5-3: Gefahreneinstufung der Inhaltsstoffe von Salzwasser-Batterien

Inhaltsstoffe	CAS-Nr.	H-Sätze / Gefahren	Wirkfaktor
Natriumsulfat	7757-82-6	<ul style="list-style-type: none"> Keine 	-
Natrium Lithium Dtitanium Triphosphate (SLTP)	Nicht angegeben	-	-
Natrium Dtitanium Triphosphate (STP)	22239-24-3	<ul style="list-style-type: none"> Kein Eintrag gefunden 	-
Lithium-Manganoxid (LMO)	39457-42-6	<ul style="list-style-type: none"> Kein Eintrag gefunden 	-
	12057-17-9 (alternativ)	<ul style="list-style-type: none"> 302 Gesundheitsschädlich bei Verschlucken 332 Gesundheitsschädlich bei Einatmen 413 Kann für Wasserorganismen schädlich sein, mit langfristiger Wirkung 	10 10 1.000
Proprietary Carbon Powders (basierend auf Carbon black / Graphit)	1333-86-4	<ul style="list-style-type: none"> Keine H351 Kann vermutlich Krebs erzeugen 	- 100

Quellen: (Aquion Energy 2015); (ECHA 2017)

Literaturverzeichnis

- Aquion Energy (2015): Aqueous Hybrid Ion Rechargeable Battery S20/S20P/S30 SDS. Online verfügbar: http://www.bluesky-energy.eu/wp-content/uploads/2014/11/SDS_Aqueous_Hybrid_Ion_Rechargeable_Battery_S20_S20P_S30-Copy.pdf; letzter Abruf am 16.10.2017.
- Aquion Energy (2016): Saubere Energiesystemen brauchen saubere Batterien. Online verfügbar: http://www.solarzentrum-hamburg.de/site/wp-content/uploads/2016/02/Wagner-Solar_Aquion-Energy_Solar-Expertenkreis-2016_01_27.pdf; letzter Abruf am 13.07.2017.
- Aquion Energy (o.J.a): Aspen 48S-2.2 Battery. Product Specification Sheet. Online verfügbar: http://info.aquionenergy.com/hubfs/01_Product_Documentation/Aquion_Energy_Aspen_48S-2.2_Product_Specification_Sheet.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- Aquion Energy (o.J.b): The Advantages of Aqueous Hybrid Ion Batteries Over Lithium Ion Batteries. Online verfügbar: <http://aquionenergy.com/technology/deep-cycle-battery/>; letzter Abruf am 10.11.2017.
- Austen, F. (Bild der Wissenschaft, Hrsg.) (2015): Lithium-Reserven am Limit? Online verfügbar: http://www.wissenschaft.de/technik-kommunikation/energie/-/journal_content/56/12054/7066932/Lithium-Reserven-am-Limit%3F/; letzter Abruf am 02.11.2017.
- BlueSky Energy (2017): Chinesen kaufen Aquion Energy. Online verfügbar: <https://www.portaldewirtschaft.de/pressemitteilung/288774/chinesen-kaufen-aquion-energy.html>; letzter Abruf am 23.10.2017.
- BlueSky Energy (2017): GreenRock - Der Salzwasser-Stromspeicher. Der sicherste & umweltfreundlichste Stromspeicher. Online verfügbar: http://www.bluesky-energy.eu/wp-content/uploads/2017/02/Endkundenflyer_GREENROCK_a4_2017-02_de.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- BlueSky Energy (o.J.): GREENROCK S-Line Stromspeicher Gesamtsystem. Technische Daten. Online verfügbar: <http://www.bluesky-energy.eu/project/greenrock-s-line-stromspeicher-gesamtsystem/>; letzter Abruf am 18.10.2017.
- BMUB (2017): Statistik Altbatterien. Verkäufe, Sammlung, Sammelquote, Recyclingeffizienz und Recyclingniveau. Online verfügbar: <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/statistik-altbatterien/>; letzter Abruf am 16.10.2017.
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2014): OECD-Leitsätze für die Erfüllung der Sorgfaltspflicht zur Förderung verantwortungsvoller Lieferketten für Minerale aus Konflikt- und Hochrisikogebieten (BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Hrsg.). Online verfügbar: http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/oecd-leitsaetze-fuer-die-erfuellung-der-sorgfaltspflicht.pdf?__blob=publicationFile&v=5; letzter Abruf am 03.11.2017.
- BSW – Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2015): Rücknahme von stationären elektrischen Energiespeichern. Online verfügbar: <https://www.solarwirtschaft.de/de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilungen-im-detail/news/ruecknahme-von-stationaeren-elektrischen-energiespeichern.html>; letzter Abruf am 03.11.2017.
- Buchert, M. & Sutter, J. (2016): Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien. Stand 09/2016. Öko-Institut e.V. Online verfügbar: <http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/LithoRec%20II-LCA-Update%202016.pdf>; letzter Abruf am 02.11.2017.
- Bunke, D. & Graulich, K. (2003): Ein Indikator für den Einsatz gefährlicher Stoffe in Produkten und Prozessen: Monoethylenglykol-Äquivalente. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung (UWSF) (15 (2)), S. 106–114.

- C.A.R.M.E.N. e.V. (2017): Marktübersicht Batteriespeicher. Informationsangebot (C.A.R.M.E.N. e.V., Hrsg.). Online verfügbar: https://www.carmen-ev.de/files/Sonne_Wind_und_Co/Speicher/Markt%C3%BCbersicht-Batteriespeicher_2017.pdf; letzter Abruf am 13.10.2017.
- Cradle to Cradle Products Innovation Institute (o.J.): Cradle to Cradle Certified™ Products Registry. Aquion Aspen Battery. Online verfügbar: <http://www.c2ccertified.org/products/scorecard/aquion-s-line-battery-stacks-aquion-energy>; letzter Abruf am 10.11.2017.
- Dehoust, G., Manhart, A., Möck, A., Kießling, L., Vogt, R., Kämper, C., Giegrich, J., Auberger, A., Priester, M., Rechlin, A. & Dolega, P. (2017): Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I). Konzeptband (Umweltbundesamt, Hrsg.). Online verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-09-28_texte_87-2017_oekoress_konzeptband_2.pdf; letzter Abruf am 02.11.2017.
- Doelling, R. (2017): Wirkungsgrad von Solar-Stromspeichern im Vergleich. Online verfügbar: www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/wirkungsgrad.html; letzter Abruf am 13.10.2017.
- Drobe, M., Killiches, F. & Franken, G. (2014): Vorkommen und Produktion mineralischer Rohstoffe - ein Ländervergleich (BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hrsg.). Online verfügbar: http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_rohstoffwirtschaftliche_einordnung_2014.pdf?__blob=publicationFile&v=4; letzter Abruf am 02.11.2017.
- ECHA – European Chemicals Agency (ECHA - European Chemicals Agency, Hrsg.) (2017): C&L Inventory Database. Online verfügbar: <https://www.echa.europa.eu/information-on-chemicals/cl-inventory-database>; letzter Abruf am 17.11.2017.
- ENBAUSA – Energetisch Bauen und Sanieren (ENBAUSA - Energetisch Bauen und Sanieren, Hrsg.) (2014): Brandgefahr auch bei Lithium-Eisenphosphat-Batterien. Online verfügbar: <https://www.enbausa.de/solarenergie/aktuelles/artikel/brandgefahr-auch-bei-lithium-eisenphosphat-batterien-3269.html>; letzter Abruf am 17.11.2017.
- EU Batterierichtlinie (2006): RICHTLINIE 2006/66/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG vom 06.09.2006. Online verfügbar: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/richtlinie_batterien.pdf; letzter Abruf am 17.11.2017.
- Europäische Kommission (2017): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. Online verfügbar: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0490&from=EN>; letzter Abruf am 17.11.2017.
- Figgenger, J., Haberschusz, D., Kairies, K., Wessels, O., Tepe, B., Ebbert, M., Herzog, R. & Sauer, D. U. (2017): Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0. Jahresbericht 2017. Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen. Online verfügbar: http://www.speichermonitoring.de/fileadmin/user_upload/Speichermonitoring_Jahresbericht_2017_ISEA_RWTH_Aachen.pdf; letzter Abruf am 31.07.2017.
- Fraunhofer ISE (2016): Speichersysteme für erneuerbare Energien auf dem Prüfstand – Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien im Fokus der Forschung. Online verfügbar: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2016/speichersysteme-fuer-erneuerbare-energien-auf-dem-pruefstand.html>; letzter Abruf am 06.11.2017.

- Hoppecke (2016): Batterierückführung und -verwertung. Die Metallhütte Hoppecke.
- KIT – Karlsruher Institut für Technologie (2014): Photovoltaik-Heimspeicher sollen sicherer werden. Online verfügbar: http://www.kit.edu/kit/pi_2014_15187.php; letzter Abruf am 03.11.2017.
- Köhler, A. R., Baron, Y., Bulach, W., Heinemann, C., Vogel, M., Behrendt, S., Degel, M., Krauß, N. & Buchert, M. (2017): Vergleichende ökonomische und ökologische Bewertung von innovativen, stationären Energiespeichertechnologien in der industriellen Produktion (VDI ZRE, Hrsg.).
- Manhart, A., Amera, T., Kuepouo, G., Mathai, D., Mng'anya, S. & Schleicher, T. (2016): The deadly business. Findings from the Lead Recycling Africa Project. Online verfügbar: <https://www.oeko.de/oekodoc/2549/2016-076-de.pdf>; letzter Abruf am 16.10.2017.
- Manhart, A. & Schleicher, T. (2015): The recycling chain for used lead-acid batteries in Ghana. Observations and general considerations. Öko-Institut e.V. Online verfügbar: <https://www.oeko.de/oekodoc/2316/2015-487-en.pdf>; letzter Abruf am 16.10.2017.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg (2017): Photovoltaik und Batteriespeicher. Technologie, Integration, Wirtschaftlichkeit (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg, Hrsg.). Online verfügbar: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/UM_PV_Batteriespeicher.pdf; letzter Abruf am 06.07.2017.
- Oltmanns, J. & Bunke, D. (2016): Compilation of chemical indicators. Development, revision and additional analyses. Statistical Working Papers, EUROSTAT, doi: 10.2785.467510. Luxemburg.
- OmniCert Umweltgutachter GmbH (o.J.): Zertifizierung des Systems Cradle to Cradle. Online verfügbar: <https://www.umweltgutachter.de/product-standard>; letzter Abruf am 10.11.2017.
- Petersen, N. H. (2015): Die Salzwasserbatterie. Photovoltaik (9/2015). Online verfügbar: <https://www.photovoltaik.eu/article-669301-30021/die-salzwasserbatterie-.html>; letzter Abruf am 18.10.2017.
- Pure Earth & Green Cross Switzerland (2016): 2016 World's worst pollution problems. The Toxics Beneath Our Feet. Online verfügbar: <http://www.worstpolluted.org/2016-report.html>; letzter Abruf am 02.11.2017.
- PV Magazine (PV Magazine, Hrsg.) (2017): Produktdatenbank Batteriespeichersysteme für Photovoltaikanlagen. pv magazine Produktdatenbank zu Heimspeichersystemen 2017. Online verfügbar: <https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/batteriespeicher/speicher-2017/>; letzter Abruf am 13.10.2017.
- Sauer, D. U. (2013): Marktanreizprogramm für dezentrale Speicher insbesondere für PV-Strom. Kurzgutachten. RWTH Aachen - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe. Online verfügbar: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Gutachten/kurzgutachten_marktanreizprogramm_bf.pdf?__blob=publicationFile&v=2; letzter Abruf am 07.07.2017.
- Stahl, H., Bauknecht, D., Hermann, A., Jenseits, W., Köhler, A., Merz, C., Möller, M., Schüler, D., Vogel, M., Jörissen, L. & Storr, U. (2016): Ableitung von Recycling- und Umweltaanforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern (Umweltbundesamt, Hrsg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_07_2016_ableitung_von_recycling-und_umweltaanforderungen.pdf; letzter Abruf am 07.07.2017.
- Süddeutsche Zeitung (Süddeutsche Zeitung, Hrsg.) (2017a): Bolivien will in Produktion von Lithium-Batterien einsteigen. Online verfügbar: <http://www.sueddeutsche.de/news/wissen/rohstoffe-bolivien-will-in-produktion-von-lithium-batterien-einsteigen-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-170812-99-616048>; letzter Abruf am 02.11.2017.

- Süddeutsche Zeitung (Süddeutsche Zeitung, Hrsg.) (2017b): Paradise Papers enthüllen geheime Geschäfte des Schweizer Rohstoffriesen Glencore. Online verfügbar: <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/glencore-paradise-papers-enthuellen-geheime-geschaefte-des-schweizer-rohstoffriesen-glencore-1.3736961>; letzter Abruf am 17.11.2017.
- Tepper, M. (2016): Solarstromspeicher - Preismonitor Deutschland. Ergebnisse 1. Halbjahr 2016, Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW) und Intersolar Europe. Online verfügbar: https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/BSW_Speicherpreismonitor_1hj_2016.pdf; letzter Abruf am 31.08.2017.
- Tjaden, T.; Weniger, J.; Bergner, J.; Beier, D. & Quaschnig, V. (2016): Energie aus PV-Anlagen intelligent speichern. Mit prognosebasierten Betriebsstrategien Abregelverluste reduzieren. In: *ep Photovoltaik Spezial* (06/2016, S. 14–18). Online verfügbar: <http://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2014/04/Tjaden-2016-Intelligent-speichern-statt-abregeln-Web.pdf>; letzter Abruf am 23.10.2017.
- Tsurukawa, N., Manhart, A. & Prakash, S. (2011): Social impacts of artisanal cobalt mining in Democratic Republic of the Congo (Öko-Institut - Öko-Institut e.V., Hrsg.).
- Umweltbundesamt (2017): Altbatterien. Masse der zurückgewonnen Sekundärrohstoffe erhöhte sich im Jahr 2015 um 18.000 Tonnen. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien>; letzter Abruf am 16.10.2017.
- Umweltbundesamt (Umweltbundesamt, Hrsg.) (2015): Lithium-Batterien und -Akkus. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/elektrogeraete/lithium-batterien-akkus>; letzter Abruf am 03.11.2017.
- Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen (2016): Marktübersicht für Solarstromspeicher bis 12 kWh (Juni 2016) (Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen, Hrsg.). Online verfügbar: https://www.verbraucherzentrale.nrw/sites/default/files/migration_files/media240343A.pdf; letzter Abruf am 13.10.2017.
- Weniger, J., Tjaden, T. & Quaschnig, V. (2017): Vergleich verschiedener Kennzahlen zur Bewertung der energetischen Performance von PV-Batteriesystemen. HTW Berlin. Online verfügbar: https://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2017/03/WENIGER-2017_03-Vergleich-verschiedener-Kennzahlen-zur-Bewertung-der-energetischen-Performance-von-PV-Batteriesystemen.pdf; letzter Abruf am 04.09.2017.
- Wohlfahrt-Mehrens, M. (o.J.): Lithium-Batterien. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung. Online verfügbar: http://www.hiu-batteries.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Broschueren/lithium_batterien.pdf; letzter Abruf am 10.11.2017.
- Württemberg, J. (2014): Der Salzwasser-Akku. Neuer Energiespeicher. Online verfügbar: <http://www.elektroniknet.de/elektronik/power/der-salzwasser-akku-108903.html>; letzter Abruf am 18.10.2017.