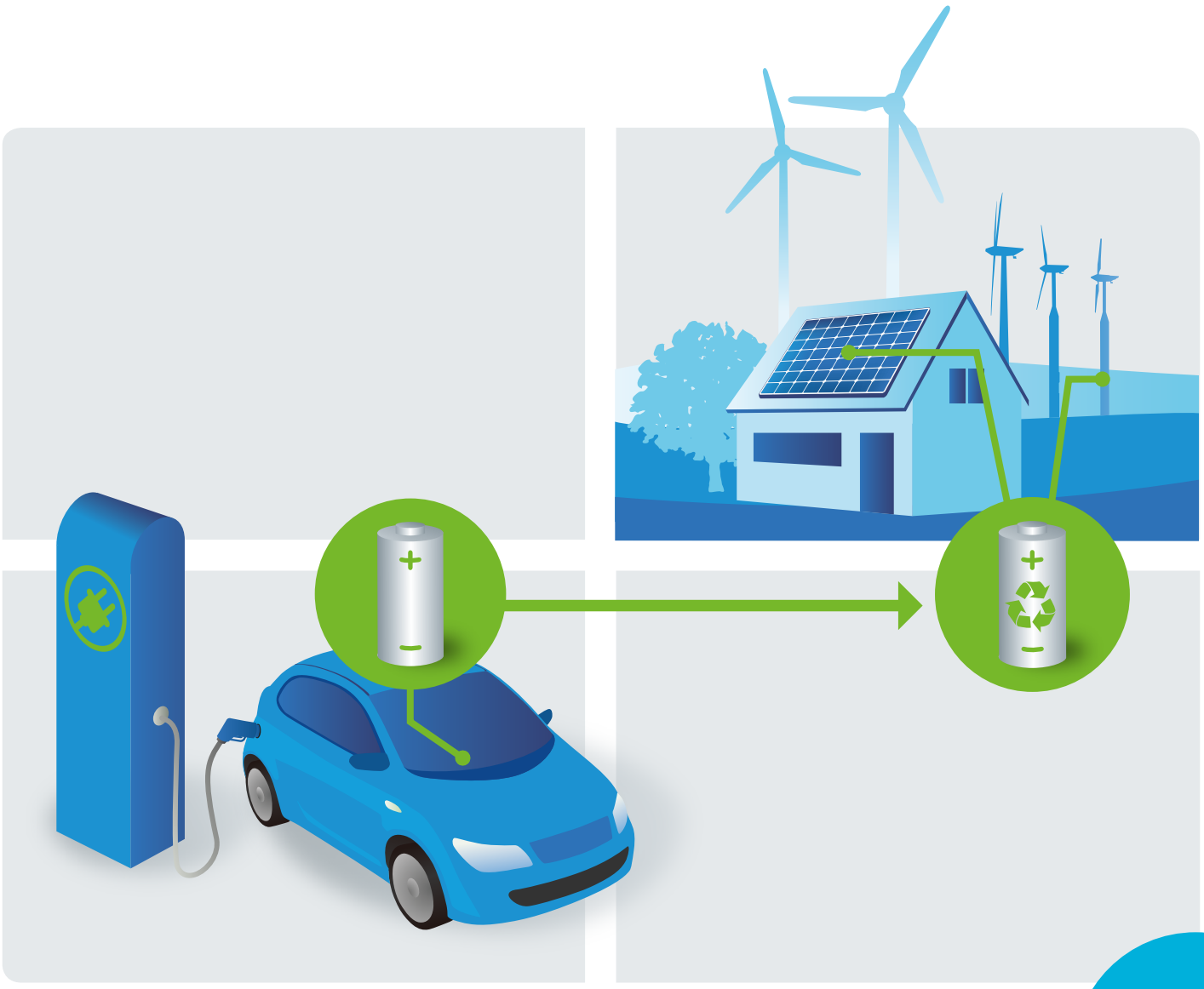
schaufenster elektromobilität

Eine Initiative der Bundesregierung

# Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen

## Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen



Ergebnispapier der Begleit- und Wirkungsforschung

18

schaufenster elektromobilität

Eine Initiative der Bundesregierung

# Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen

## Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen

Februar 2016

# Verzeichnisse

# Inhaltsverzeichnis


Verzeichnisse I
Inhaltsverzeichnis I
Abbildungsverzeichnis III
Tabellenverzeichnis V
Executive Summary VI
1 Einführung 4
2 Zielsetzung und Vorgehen 6
3 Aktueller Stand: Literatur und Projekte 10
4 Ablauf von Second-Life-Konzepten 14
5 Potenziale und Herausforderungen 18
6 Umfeldanalyse 22
6.1 Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen 23
6.2 Batteriekostenentwicklung 25
6.3 Verfügbarkeit von Second-Life-Batterien 27
7 Alterung und Wiederaufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien 28
7.1 Definition notwendiger Batterieparameter 29
7.2 Alterungsmechanismen und -verhalten 31
7.3 „End of Life“-Kriterien 34
7.4 Streuungsverhalten 37
7.5 Wiederaufbereitungsprozess 39
7.5.1 Ablauf 40
7.5.2 Beispiel für einen Alterungsschnelltest 44
8 Identifikation von Second-Life-Anwendungen 46
8.1 Stakeholderanalyse und Übersicht 48
8.2 Auswahl von Second-Life-Anwendungen 52
8.3 Beschreibung der Second-Life-Anwendungen 52
8.3.1 Fallbeispiele 53
8.3.2 Weitere Anwendungen 64

9 Modellierung des Alterungsverhaltens 72
9.1 Fahrzeugbetrieb über Garantieangaben 73
9.2 Ersatzschaltbildbasierter Ansatz 74
9.2.1 Funktionsweise 75
9.2.2 Ergebnisse und Diskussion 79

10 Maximaler theoretischer Restwert 82
10.1 Ansatz 83
10.2 Ergebnisse und Diskussion 85
10.3 Bleisäurebatterien 87
10.4 Reparieren defekter Traktionsbatterien 89
10.5 Recycling 90

11 Wirtschaftlichkeitsbewertung 92
11.1 Grundlagen: Kapitalwertmethode und Rentabilität 93
11.2 Primärregelleistung 94
11.3 Hausspeichersysteme 97
11.4 Fazit: Rentabilitätsbewertung 101
11.5 Total Cost of Ownership 102

12 Ökologische Bewertung 106
12.1 Umweltwirkungen der Elektromobilität 107
12.2 Ökobilanzierung von Second-Life-Batterien 110
12.3 Ökologische Bewertung der Fallbeispiele 113
12.4 Fazit und Ausblick: Ökologische Bewertung 117

13 Fazit 120

Anhang A
Danksagung A
Abkürzungen/Glossar B
Literaturverzeichnis D
Ergebnispapiere der BuW P
Impressum T

# Abbildungsverzeichnis


A01 Aufbau der Studie 7

A02 Schematischer Grundablauf eines Second-Life-Konzepts 15

A03 Ergebnisse der SWOT-Analyse von Second-Life-Batterien 20

A04 Prognosen zur Marktdurchdringung von xEV mit quadratischer Extrapolation (BEV und PHEV) 24

A05 Entwicklung und Vorhersage von LITB-Neupreisen basierend auf verschiedenen Studien 26

A06 a) Entwicklung der relativen Kapazität über ÄVZ mit Angabe dreier charakteristischer Bereiche und b) zugehöriger Impedanzen 33

A07 Schematischer Kapazitätsverlauf mit qualitativ angegebenen EoL-Kriterien 36

A08 Box-Plots zur Verdeutlichung der zunehmenden Streuung von Zellparametern während des Alterungsfortschritts 38

A09 Möglicher Ablauf der Wiederaufbereitung gealterter LITB hin zu SL-Batterien 41

A10 Streudiagramm von unter verschiedenen Betriebsbedingungen im Labor zyklisierten LIZ während des Alterungsverlaufs vom Neuzustand bis hin zu Restkapazitäten von ca. 80 % 45

A11 Rücklaufzahlen in Tonnen im Jahr 2010 47

A12 Übersicht der Stakeholder von SL-Batterien 48

A13 Erläuterung der Systematik zur Identifikation potenzieller Anwendungsfälle am Beispiel des Stromerzeugers nach 50

A14 Übersicht der identifizierten Anwendungsfälle für SL-Batterien unterteilt nach Stakeholdern 51

A15 Historischer Bedarf an PRL 54

A16 Mittlerer gewichteter Preis von PRL 55

A17 Steckbrief für die Bereitstellung von PRL 58

A18 Effektives Lastprofil der Batterie eines 200 kW/200 kWh-Batteriespeichers für die PRL-Bereitstellung am Beispiel sieben beliebiger Tage 59

A19 Steckbrief für den Einsatz als HSS 62

A20 Lastprofil des HSS in Kalenderwoche 33 64

A21 Lastprofil des HSS in Kalenderwoche 2 65

A22 Über die Garantieangabe eines amerikanischen Fahrzeugherstellers abgeleiteter Kapazitätsverlauf einer LITB im Fahrzeugbetrieb. Der Referenzfall mit Basisjahr 2015 wurde um zu erwartende Technologiefortschritte ergänzt. 74

A23 Schema der Funktionsweise des verwendeten alterungsberücksichtigenden Gesamtmodells zur Prädiktion des Alterungsverhaltens von LIB in beliebigen Anwendungen 76

A24 Darstellung des einjährigen Leistungsprofils des HSS, des über die ESB-basierte Alterungssimulation ermittelten Kapazitätsverlaufs sowie zugehöriger Fitting-Funktion 77

A25 Alterungsverläufe von unterschiedlich ausgelegten Batteriespeichern (Graphit-Anode, NMC-Kathode) im HSS 80

A26 Alterungsverläufe unterschiedlich ausgelegter Batteriespeicher (Graphit-Anode, NMC-Kathode) für die Bereitstellung von PRL 81

A27 Maximale theoretische Kostengrenzen $K_{SLB, max}$ während der Batteriealterung im Fahrzeug im Vergleich zu entsprechenden Preisen neuer LITB 86

A28 Maximale theoretische Kostengrenze $K_{SLB, max}$ bei einem SoH = 80 % im Vergleich zu entsprechenden Preisen neuer LITB 87

A29 Zahlungsströme und Kapitalwert für den Einsatz eines Neubatteriespeichers und eines SL-Batteriespeichers für die PRL-Bereitstellung (Restwert = 50 % des Batterieneupreises) 96

A30 Eigendeckungsgrad in Abhängigkeit von PV-Anlagen und Speichergröße (Jahresstromverbrauch: 4300 kWh) 99

A31 Zahlungsströme und Kapitalwert für den Einsatz eines HSS mit und ohne Überdimensionierung 100

A32 Schematische Zusammensetzung der Total Cost of Ownership eines Elektrofahrzeugs 102

A33 Kumulierter Energieaufwand (KEA) für ein ICEV, ein BEV und ein BEV mit Range Extender nach 108

A34 Systemgrenze und berücksichtigte Prozesse der untersuchten Fallbeispiele 114

A35 Einflussfaktoren auf das ökologische Einsparpotenzial von Second-Life-Konzepten 118

# Tabellenverzeichnis


T01 Kennwerte für die PRL-Bereitstellung 60

T02 Kennwerte für das Lastprofil von HSS 63

T03 Parameter der ermittelten Alterungsfunktionen $C = 1 - \alpha \cdot t^{\beta}$ für HSS sowie PRL-Bereitstellung in originaler sowie überdimensionierter Batterieauslegung 78

T04 Konstante Alterungsraten **ω** für das Alterungsverhalten von SL-Batterien 81

T05 Kennwerte für die Wirtschaftlichkeitsbewertung der PRL-Bereitstellung 95

T06 Wirtschaftliche Kennwerte für HSS 98

# Executive Summary

Die vorliegende Studie untersucht die möglichen ökonomischen und ökologischen Vorteile der Weiterverwendung von Traktionsbatterien in Second-Life(SL)-Anwendungen. Sie orientiert sich dabei mit Blick auf die Batterie an den vier Kernprozessen der Umsetzung von SL-Konzepten: Fahrzeugbetrieb, Wiederaufbereitung, SL-Anwendung und Recycling. Durch eine gründliche Auswertung der vorliegenden Fachliteratur gibt sie einen Überblick über den Sachverhalt und den Stand der aktuellen Diskussion. Darauf aufbauend benennt sie in einer SWOT- und in einer Umfeldanalyse die wesentlichen Potenziale, Herausforderungen und Einflussfaktoren des Einsatzes von gebrauchten Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (LITB) in SL-Anwendungen. Dabei zeigt sich, dass die Gestaltung der Wiederaufbereitung und die Auswahl der Anwendung entscheidende Erfolgsdeterminanten von SL-Konzepten sein werden. Beide Aspekte werden ausführlich thematisiert. Daran anknüpfend, modellieren die Studienautoren zwei für die Wirtschaftlichkeitsbewertung zentrale Parameter, nämlich das Alterungsverhalten von LITB und deren maximalen theoretischen Restwert am Ende ihres „First Life“. Das ermöglicht ihnen abschließend, eine fundierte Bewertung des ökonomischen Potenzials und der ökologischen Effektivität von SL-Anwendungen vorzunehmen.

Das Ergebnis dieser Bewertung belegt – einen wachsenden Elektromobilitäts- und Batteriespeichermarkt vorausgesetzt – ein erhebliches Potenzial für SL-Anwendungen.

Für SL-Batterien mit einer Restkapazität von 80 Prozent wurde näherungsweise ein maximaler Verkaufswert von 50 Prozent des Batteriesystemneupreises zum Verkaufszeitpunkt ermittelt. Durch Verschieben oder sogar Vermeiden der aufzubringenden Recyclingkosten könnten zudem Anreize bestehen, SL-Batterien erheblich kostengünstiger anzubieten.

Zwei besonders erfolgversprechende Anwendungen von SL-Batteriespeichern sind nach den Erkenntnissen dieser Studie einerseits die Bereitstellung von Primärregelleistung an einen Stromnetzbetreiber, andererseits der Einsatz als elektrische Hausspeicher, die an eine Photovoltaik-Anlage gekoppelt sind. Die Rentabilität dieser beiden Anwendungen kann durch den Einsatz von SL-Batterien statt von neuen Batterien deutlich gesteigert werden, wie die mittels der Kapitalwertmethode vorgenommene Wirtschaftlichkeitsbewertung zeigt. Für die Bereitstellung von Primärregelleistung konnte nach 20 Jahren eine Erhöhung des Kapitalwerts um 33 Prozent, für Hausspeichersysteme eine Verbesserung um 26 Prozent festgestellt werden. Nur einen geringen Effekt haben SL-Konzepte dagegen auf die Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen. Der Restwert einer gealterten LITB würde

einer Total-Cost-of-Ownership-Berechnung zufolge aufgrund fallender Batteriepreise und der aktuell hohen Anschaffungskosten den Kaufpreis eines Elektrofahrzeuges nur um drei Prozent senken.

Unter ökologischen Gesichtspunkten ist der Einsatz von SL-Batterien sehr zu empfehlen, insofern diese an Stelle einer neuen Batterie verwendet werden. Sie senken die mit der Batterieproduktion verbundenen Emissionen von Treibhausgasen (THG) und anderen schädlichen Stoffen signifikant. Unter den in dieser Studie gewählten Rahmenbedingungen konnte je kWh Nennkapazität der Traktionsbatterie ein THG-Einsparpotenzial von 34 bis 106 kg $CO_2$-Äquivalenten für die Bereitstellung von Primärregelleistung und von 30 bis 95 kg $CO_2$-Äquivalenten für den Einsatz als Hausspeichersystem bestimmt werden. Zudem verringert die Verwendung von SL-Speichern den Neubedarf an kritischen Rohstoffen wie Nickel und Lithium.

Um das Potenzial von SL-Anwendungen auszuschöpfen, sind neben zuverlässigeren rechtlichen Rahmenbedingungen vor allem eine Standardisierung der Batterie-Module und Forschungs- und Entwicklungsfortschritte in der Wiederaufbereitung notwendig. Ohne standardisierte primäre Produktionsprozesse würde die effiziente Montage von SL-Speichern erschwert, weil ihre Ausgangsprodukte von verschiedenen Herstellern nicht ohne weiteres kompatibel wären. Da die Vermessung und Auswahl weiterverwendbarer Batteriemodule mit einem großen Aufwand verbunden sind, stellt die Entwicklung effizienter Alterungsschnelltests ein Schlüsselelement bei der Umsetzung von SL-Konzepten dar. Zudem kommt es bei dem Einsatz von SL-Batterien darauf an, nichtlineare Alterungsprozesse zu verzögern oder gar zu verhindern. Das ist zwar durch die rechtzeitige Entnahme von Traktionsbatterien aus Elektroautos sowie die Auswahl einer geeigneten Betriebsstrategie in der SL-Anwendung prinzipiell heute schon möglich, jedoch bedarf es weiterführender Praxisuntersuchungen und dem Einsatz von hochwertigen Batterien mit geringer Alterung. Denn für einen wirtschaftlichen Betrieb von SL-Batterien ist eine ausreichend lange Lebensdauer essenziell.

# 1 Einführung

Die Zukunftsvision, in der Deutschland größtenteils aus erneuerbaren Energien (EE) versorgt wird und weder Transportmittel noch industrielle Prozesse direkte Emissionen ausstoßen, befindet sich schon in der Umsetzung und soll laut Bundesregierung bereits in der kommenden Generation Realität werden. So sollen bis 2050 schon 80 % der Stromerzeugung aus EE stammen und 80 % bis 95 % weniger Emissionen ausgestoßen werden als in 1990. Diese Vision ist nur möglich, wenn die etwa 60 Mio. Fahrzeuge in Deutschland weniger Schadstoffe durch Kraftstoffverbrennung ausstoßen. Bis 2020 hat sich die Bundesregierung ein Etappenziel von mindestens einer Million voll- und teilelektrifizierter Fahrzeuge (xEV) auf Deutschlands Straßen gesetzt. Ein flächendeckender Umstieg auf Elektromobilität in Verbindung mit regenerativer Energieerzeugung gilt grundsätzlich als alternativlos, um langfristig auf fossile Energieträger zu verzichten und Schadstoffemissionen zu reduzieren.

Den hohen Anforderungen an Leistungs- und Energiedichte im batterieelektrischen Fahrzeug (BEV) werden gealterte Traktionsbatterien (nach ca. 7–10 Jahren Einsatz) nicht mehr gerecht. Eine Weiterverwendung (Second-Life: SL) gealterter Batterien bietet sich daher an, da die Lebensdauer gebrauchter Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (LITB) durch die milderen Lastprofile sekundärer Speicheranwendungen verlängert werden kann. Durch den Einsatz in SL-Anwendungen besteht die Möglichkeit, zusätzliche Erlöse zu generieren beziehungsweise Kosten einzusparen. Zudem kann auch die Verbesserung der Öko- und Energiebilanz aufgrund vermiedener Produktion neuer elektrochemischer Batteriespeicher (i. d. R. Lithium-Ionen-Batterien (LIB)) eine Motivation für SL-Anwendungen darstellen.

Im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte wurden bereits erste Erkenntnisse bzgl. des Einsatzes gealterter LITB in SL-Anwendungen gewonnen. Zudem wurden Pilotprojekte durchgeführt, in denen der Betrieb von SL-Batterien erprobt wurde. Es bestehen jedoch nach wie vor erhebliche Unsicherheiten bezüglich der wirtschaftlichen Darstellbarkeit sowie der Auswirkungen von SL-Anwendungen auf die Umwelt und die Kosten von BEV. Diese Aspekte werden daher im Rahmen der vorliegenden Studie näher untersucht.

# 2 Zielsetzung und Vorgehen

**A01:** Aufbau der Studie

Ziel dieser Studie ist es, einen umfassenden Überblick über den Themenbereich von SL-Konzepten für LIB aus BEV zu geben. In diesem Zusammenhang sollen die Kernfragen nach Einsatzfeldern, technischer Umsetzbarkeit, Ökonomie und Ökologie von SL-Batterien sowohl qualitativ als auch quantitativ bewertet werden.

Um diese Kernfragen zu beantworten, wird wie in Abbildung A01 dargestellt vorgegangen. Nach einer umfassenden Vermittlung von Grundlagen zu SL-Konzepten erfolgt die Modellierung des Alterungsverhaltens und des Restwerts von SL-Batterien, um abschließend eine wirtschaftliche und ökologische Bewertung durchführen zu können.

In Kapitel 3 wird zunächst eine Übersicht über die aktuelle Literatur zu der Thematik sowie eine Aufzählung themenbezogener Forschungsprojekte gegeben. Mit dem Ziel ein grundlegendes Verständnis der relevanten Prozesse zu vermitteln, wird im Anschluss daran in Kapitel 4 der grundsätzliche Aufbau von SL-Konzepten dargestellt. In Kapitel 5 werden dann die Potenziale und Herausforderungen von SL-Konzepten aufgezeigt, wobei auf die Methodik der SWOT-Analyse zurückgegriffen wird. In Kapitel 6 erfolgt eine Umfeldanalyse, im Rahmen derer aktuelle Marktentwicklungen zu BEV und LITB dargestellt werden. Die Alterung der Batterien ist ein weiterer entscheidender Faktor für das Potenzial von SL-Konzepten. Daher werden in Kapitel 7 die entsprechenden Grundlagen zu Alterungs-

prozessen von LIB dargelegt und in Bezug auf die Umsetzbarkeit von SL-Konzepten diskutiert.

Auf Basis der Erkenntnisse der Kapitel 3 bis 7 können anschließend geeignete SL-Anwendungen identifiziert werden (siehe Kapitel 8). Dabei wird insbesondere auf die Stakeholder und deren Handlungsfelder eingegangen. Aus den identifizierten Anwendungen werden dann in Zusammenarbeit mit dem Studienbeirat zwei zukunftsträchtige Fallbeispiele ausgewählt, die im weiteren Verlauf der Studie näher untersucht werden. Diese sind die Bereitstellung von Primärregelleistung (PRL) und der Einsatz als Hausspeichersystem (HSS). In Kapitel 9 wird zunächst der Ansatz zur Modellierung des Alterungsverhaltens beschrieben und dann explizit das Alterungsverhalten für die beiden untersuchten Fallbeispiele aufgezeigt. Für die anschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird in Kapitel 10 der Restwert ausgedienter LITB abgeschätzt und diskutiert. Der theoretisch erzielbare Restwert von gealterten LITB wird dabei in Bezug zu Recyclingkosten sowie potenziellen SL- Alternativen (Reparieren defekter LITB, Konkurrenztechnologie Bleisäurebatterien (Pb-Batterien)) gesetzt.

Die Beschreibung der Anwendungsfälle in Kapitel 8, das modellierte Alterungsverhalten aus Kapitel 9 und der in Kapitel 10 bestimmte theoretisch erzielbare Restwert gealterter LITB werden abschließend in Kapitel 11 zusammengeführt, um eine wirtschaftliche Bewertung der Fallbeispiele mithilfe der Kapitalwertmethode vorzunehmen. Zudem werden die Auswirkungen von SL-Konzepten auf die Total Cost of Ownership (TCO) von BEV anhand eines Beispiels diskutiert. In Kapitel 12 werden die SL-Konzepte dann schließlich durch Diskussion und Quantifizierung von Ressourcen- und Emissionseinsparpotenzialen einer ökologischen Bewertung unterzogen. Abschließend werden die Studienergebnisse in Kapitel 13 zusammengefasst. Zudem wird ein Ausblick hinsichtlich der Handlungsoptionen und des weiteren Forschungsbedarfs gegeben.

# 3 Aktueller Stand: Literatur und Projekte

Eine mögliche Weiterverwendung gealterter LITB in weniger strapaziösen Anwendungen, wie z. B. der stationären Energiespeicherung, stellt ein derzeit häufig diskutiertes Konzept zur Kostenreduktion von BEV dar. Mit den dadurch prinzipiell kostengünstig verfügbar werdenden Batterien könnte zudem der Einzug von Batteriespeichern in stationären Anwendungen gefördert werden. Da das Recyceln gealterter LITB im Gegensatz zu Pb-Batterien derzeit noch nicht wirtschaftlich umsetzbar ist, der Hersteller eines Endprodukts mit Batteriespeicher allerdings nach dem deutschen Batteriegesetz (BattG) dazu in erster Instanz verpflichtet ist, könnten die dabei anfallenden Kosten durch ein SL-Konzept um Jahre nach hinten verschoben werden (1) (2) (3). In diesem Kapitel soll der aktuelle Stand solcher SL-Konzepte anhand einer übersichtlichen Darstellung verfügbarer Fachliteratur und einer Aufzählung öffentlicher Projekte nähergebracht werden.

Als 1990 das „Zero Emissions Vehicle“ (ZEV) -Mandat in Kalifornien in Kraft trat, mit dem Ziel eines ZEV-Anteils von 2 %, 10 % bzw. 18 % bis 1998, 2003 bzw. 2018, führte dies zu einer gesteigerten Entwicklung von BEV sowie ersten Vorschlägen bzgl. der Weiterverwendung gealterter LITB in SL-Anwendungen (4). In einem ersten Bericht hierzu verglich das Argonne National Laboratory 1998 das Alterungsverhalten von Pb-Batterien mit dem von Nickelmetallhydridbatterien (NiMH) für das United States Advanced Battery Consortium (USABC) (5). Es konnte gezeigt werden, dass zuvor in BEV genutzte NiMH-Traktionsbatterien die Anforderungen in stationären Anwendungen erfüllen und insbesondere mit den üblicherweise verwendeten Pb-Batterien mithalten können. In einem anknüpfenden Bericht untersuchte Sandia National Laboratories 2003 die Wirtschaftlichkeit von SL-Konzepten für gealterte NiMH-Traktionsbatterien (6). Die Autoren zeigten, dass solche Konzepte aus technischer Sicht gut umsetzbar sind, äußerten aber Bedenken bzgl. der Wirtschaftlichkeit. Insbesondere eine standardisierte, modulare Bauweise der Batteriepacks sei unumgänglich für eine profitable Umsetzung der Weiterverwendung gealterter Traktionsbatterien. Als prinzipiell vielversprechende Einsatzgebiete wurden Back-Up-Speicher für Telekommunikationssysteme, dezentrale Batteriespeicher mit dem Ziel vermiedener Netzausbauten sowie Zwischenspeicher regenerativer Energien im häuslichen sowie mittelgroßen gewerblichen Bereich identifiziert. Als wesentliche Unsicherheit einer wirtschaftlichen Umsetzung wurde das nur schwer vorhersagbare Alterungsverhalten der NiMH-Batterien aufgeführt.

Auf diese Problematik wird in (7) auch für LIB hingewiesen. Zudem wird aufgeführt, dass gealterte LITB besonders im Endnutzerbereich (z. B. als Zwischenspeicher regenerativer Energien im häuslichen Bereich) im Gegensatz zu (netzdienlichen) Großspeichersystemen, sinnvoll erscheinen, da das Umrüsten bzw. Aufbereiten der Speicher weniger Aufwand erfordert. Hingegen wird in (8) und (9) angegeben, dass eine wirtschaftliche Um-

setzung netzdienlicher Großspeicher mit SL-Batterien durch die Kombination verschiedener Anwendungsfelder, wie z. B. der Bereitstellung von PRL und dem Erzielen von Arbitrageerlösen, machbar erscheint. Der Einsatz gebrauchter LITB in Micro-Grid-Systemen in Entwicklungsländern wird in (10) als Alternative zu Pb-Batterien aufgeführt. Dabei bestünden sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile. Erstere werden in (11) und (12) bestätigt. Aufgrund einer höheren volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte von SL-Batterien (bei einer Restkapazität von 70 %) verglichen mit Pb-Batterien bestehen insbesondere auch Vorteile beim Transport (10). Das ökologische Potenzial einer SL-Anwendung ist, wie (13), (14) und (15) zeigen, von der betrachteten Anwendung, dem jeweiligen Strommix sowie der Konkurrenztechnologie abhängig. Wird durch den Einsatz einer SL-Batterie die Produktion einer Neubatterie vermieden, so ist gemäß (16) und (17) von einem ökologischen Einsparpotenzial der SL-Batterie auszugehen.

In aktuellen Beiträgen zur SL-Thematik wird übereinstimmend davon ausgegangen, dass das Potenzial zur Reduktion der Anschaffungskosten von BEV äußerst gering bis nicht vorhanden ist. Durch die bei gelungener Umsetzung von SL-Konzepten verfügbar werdenden kostengünstigen Batteriespeicher könne aber die Speicherung und Integration regenerativer Energien gefördert, und dadurch ggf. einer Erhöhung von Treibhausgasemissionen oder auch der Strompreise entgegengewirkt werden. So ließen sich zwar die Anschaffungspreise von BEV nicht wesentlich reduzieren, dennoch ergäbe sich ein erheblicher Nutzen für die breite Gesellschaft durch eine flächendeckende Einführung von SL-Konzepten. (18) (19) (20)

Neben technischen Hürden bei der Umsetzung bestehen laut (21) und (22) zudem rechtliche sowie logistische Fragestellungen (z. B. Garantieansprüche, Besitzverhältnisse, etc.), die beantwortet werden müssen. Bezüglich der technischen Hürden erwiese sich eine standardisierte, modulare Bauweise von Traktionsbatterien als sinnvoll, um die Wiederaufbereitungskosten von SL-Batterien zu minimieren. Da das Wiederaufbereiten gealterter Traktionsbatterien im Wesentlichen daraus bestünde, diese ggf. in ihre modularen Einheiten zu zerlegen, geeignete Module auszuwählen und wieder zu neuen Batteriespeichern in gewünschter Größe zusammenzusetzen, müssten insbesondere auch geeignete Verfahren zur kosteneffizienten Alterungsdetektion (z. B. Online-Tracking benötigter Größen bzw. Alterungsschnelltests) entwickelt werden, um so SL-Konzepte profitabler umsetzen zu können. Da stationäre Energiespeicher meist über längere Zeiträume eingesetzt werden, ist es zudem essentiell, das Alterungsverhalten der Batterien zu verstehen und somit vorhersagen zu können. Nur bei vorhersagbarem Alterungsverhalten lässt sich auf die zu erwartenden Kosten und Erlöse schließen, welche sich wiederum direkt auf die Investitionen und somit auch auf die Investitionsentscheidung auswirken. (21) (22)

Aufgrund der noch zu überwindenden Hürden bei der Umsetzung von SL-Konzepten und der geringen Verfügbarkeit von gealterten LITB finden sich vorrangig Forschungsprojekte zu dieser Thematik. Derzeit befindet sich das Projekt „Second Life Batteries“ aus einer Allianz der BMW Group, Vattenfall und Bosch in der Planungsphase (23). Bis Mitte 2016 soll ein netzdienlicher Großspeicher mit einer Kapazität von 2 MWh und einer Leistung von 2 MW aus gealterten BMW ActiveE- und BMW i3-Traktionsbatterien in Hamburg gebaut werden. Der Speicher soll am Regelleistungsmarkt teilnehmen. Ein Joint Venture, bestehend aus Daimler Automotive, The Mobility House und der GETEC Gruppe, baut derzeit in Nordrhein-Westfalen ebenfalls einen Batteriegroßspeicher aus ca. 650 gealterten LITB mit einer Kapazität von 13 MWh und einer Leistung von 13 MW zur Bereitstellung von PRL (24). In einem früheren Projekt testete Vattenfall und die BMW Group bereits die Fähigkeit gealterter Traktionsbatterien als Pufferspeicher für Schnellladesäulen elektrischer Fahrzeuge. Die Umsetzbarkeit eines solchen Pufferspeichers für Schnellladesäulen mit SL-Batterien wurde zudem in (25) simuliert und experimentell bestätigt. Als weiteres großes Second-Life-Pilotprojekt sei das Vorhaben von EDF, Forsee Power, Mitsubishi Motors Corporation und PSA Peugeot-Citroën genannt, welches im September 2015 auf dem Geschäftssitz von Forsee Power in der Nähe von Paris starten soll (26). In dem Projekt werden Solarmodule und BEV (inkl. Ladesäulen) zur Netzentlastung, sowie zur Deckung des Eigenbedarfs des Forsee Power Hauptgebäudes, bidirektional mit neuen Batteriespeichern sowie SL-Batterien verbunden. Abschließend seien noch die geförderten Forschungsvorhaben Sun2Car@GAP, EOL-IS, ABattReLife sowie StaTrak erwähnt, die sich u. a. mit der Second-Life-Thematik befassen.

# 4 Ablauf von Second-Life-Konzepten

Nach der Darstellung des aktuellen Stands der Umsetzung von SL-Konzepten wird in diesem Kapitel kurz auf den schematischen Ablauf solcher Weiterverwendungsszenarien eingegangen. Zwar gibt es grundsätzlich eine Vielzahl an verschiedenen Ablaufmöglichkeiten, die sich z. B. hinsichtlich der Besitzverhältnisse in verschiedenen Stadien eines SL-Konzepts unterscheiden, dennoch gibt es bestimmte Prozesse, die in jedem Fall durchlaufen werden. Diese „Kernprozesse“ werden in diesem einführenden Kapitel kurz erläutert, auch um fortan verwendete Begriffe voneinander abzugrenzen. Abbildung A02 zeigt schematisch den Grundablauf eines SL-Konzepts, beschränkt auf die letztendlich immer enthaltenen Kernprozesse.

Der Einsatz als Traktionsbatterie im BEV stellt die erste Station im Grundablauf eines SL-Konzepts dar, weswegen dieses Stadium oft auch als „First Life“ bezeichnet wird. Erreicht die Batterie schließlich einen Alterungszustand, ab dem die Anforderungen im Fahrzeugbetrieb nicht mehr erfüllt werden können, so muss diese durch eine neue Traktionsbatterie ausgetauscht werden. Die gealterte Batterie, die das so genannte „End of Life“ (EoL) erreicht hat, kann nun entweder recycelt, oder für eine Weiterverwendung in einer SL-Anwendung aufbereitet werden. Das EoL-Kriterium im „First Life“ wird im Folgenden als E01L bezeichnet.

Der Wiederaufbereitungsprozess umfasst verschiedene Schritte. Zunächst wird die Traktionsbatterie aus dem Fahrzeug ausgebaut und bei Bedarf in kleinere Batterieeinheiten (Module, Zellen, etc.) zerlegt. Aus wirtschaftlicher Sicht erscheint dabei lediglich das Zerlegen in die nächstkleinere Einheit, d. h. ein Zerlegen der Traktionsbatterie bis auf Modulebene darstellbar. Ein Zerlegen bis auf Zellebene wäre hingegen mit einem zu hohen Arbeitsaufwand verbunden. Wird ein Großspeichersystem aus SL-Batterien aufgebaut, so werden evtl. ganze Traktionsbatterien miteinander verschaltet, um den Wiederaufbereitungsaufwand zu minimieren. Eine Traktionsbatterie besteht neben den Lithium-Ionen-Zellen (LIZ) aus verschiedenen Komponenten wie Batteriemanagementsysteme (BMS), Sensoren, Kühlung und Gehäuse. Eine Weiterverwendung dieser Komponenten in SL-Konzepten ist dabei grundsätzlich denkbar.

Liegen schließlich die Batterieeinheiten ausgebaut und bis zur gewünschten Ebene zerlegt vor, so muss der Alterungszustand detektiert werden, um zu beurteilen, ob eine Weiterverwendung in einer SL-Anwendung ökonomisch sinnvoll ist. Idealerweise können im Fahrzeug aufgezeichnete Daten ausgelesen und ausgewertet werden, um auf den „State of Health“ (SoH) der Batterieeinheiten rückzuschließen. Derzeit muss aber davon ausgegangen werden, dass die im BMS hinterleg-

**A02:** Schematischer Grundablauf eines Second-Life-Konzepts

ten Algorithmen zur Zustandsschätzung dies nicht ermöglichen. Zudem darf bezweifelt werden, dass der Fahrzeughersteller diese Daten weitergeben würde, sollte dieser nicht selbst die SL-Batterien aufbereiten und dann betreiben bzw. an einen SL-Anwendungsbetreiber weiterverkaufen. Reichen die aufgenommenen Daten nicht aus, so müssen die Batterieeinheiten aufwendig vermessen werden. Da herkömmliche Verfahren z. B. zur Kapazitätsmessung allerdings zeitaufwendig und daher teuer sind, ist die Entwicklung von Alterungsschnelltests vorübergehend als ein Schlüsselelement für eine ökonomisch sinnvolle Umsetzung von SL-Konzepten zu sehen. Nachdem der SoH einer jeden zu untersuchenden Batterieeinheit vorliegt (wie auch immer bestimmt), können diese anhand ihrer Güte klassifiziert und der mögliche Weiterverwendungswert abgeleitet werden. Es sei hier bereits angemerkt, dass der Wert einer SL-Batterie von der jeweiligen SL-Anwendung abhängt. Hierbei wird der Wert konkret durch die Anwendung bestimmt, bei der dieser maximal wird. Nach der Klassifizierung und Auswahl weiterverwendbarer Batterieeinheiten mit möglichst ähnlichen Zellparametern können diese schließlich zu neuen Batterien in benötigter Größe (Kapazität, Leistung, etc.) zusammengesetzt werden. Hierbei muss überprüft werden, inwieweit weitere Komponenten der Traktionsbatterie, wie z. B. das BMS etc., an die Anforderungen der SL-Anwendung angepasst werden können. Ziel ist es stets, die Kosten der gesamten Wiederaufbereitung der Traktionsbatterien so gering wie möglich zu halten. Liegen letztendlich die fertig montierten „neuen“ SL-Batterien vor, so können diese in ihrer neuen Umgebung installiert werden.

Die SL-Batterien werden schließlich unter – aus ökonomischer sowie ökologischer Sicht – optimalen Betriebsbedingungen (i. d. R. eine möglichst lange aber auch kosteneffiziente Einsatzzeit) eingesetzt. Auch in der SL-Anwendung kommt es allerdings ab einem bestimmten Alterungszustand zum Erreichen eines EoL, welcher im Folgenden als Eo2L bezeichnet wird. Nach Erreichen dieses Zustands ist die Batterie nicht mehr zu gebrauchen und muss recycelt werden. Die Zuständigkeit hierfür hängt von den Besitzverhältnissen ab: Gemäß dem BattG muss der Hersteller eines Endprodukts mit Batteriespeicher diesen für den Endverbraucher entsorgen (2). Wäre dies i. d. R. der Fahrzeughersteller, so sind in einem SL-Konzept auch Konstellationen denkbar, in denen nach Änderung der Besitzverhältnisse die Pflicht zum Recycling in Absprache übertragen werden kann. Dies gilt für den Fall, dass der neue Besitzer ebenfalls Hersteller oder Vertreiber eines Endprodukts, aber nicht der Fahrzeughersteller ist. Alternativ zum Recycling nach Erreichen des Eo2L wäre es theoretisch vorstellbar, gealterte SL-Batterien in

einer „Third-Life-Anwendung“ usw. mit einem noch milderen Lastprofil einzusetzen. Ein solcher Ansatz wäre in der Praxis allerdings nicht wirtschaftlich umsetzbar.

Basierend auf dem in Abbildung A02 dargestellten schematischen Grundablauf eines SL-Konzepts wird rechts eine in diesem Studienbericht geltende Definition einer SL-Batterie angegeben.

**Definition einer Second-Life-Batterie:**

Unter einer Second-Life-Batterie wird ein Batteriesystem verstanden, welches aus in reinelektrischen Fahrzeugen gealterten Traktionsbatterieeinheiten besteht, die für die Weiterverwendung in geeigneten, sinnvollerweise weniger strapaziösen Anwendungen (stationär oder mobil) wiederaufbereitet wurden.

# 5 Potenziale und Herausforderungen

Im Folgenden werden die Potenziale sowie Herausforderungen für den Einsatz von gebrauchten LITB in SL-Anwendungen dargestellt. Hierzu wird eine mehrstufige SWOT-Analyse durchgeführt. Im Rahmen einer SWOT-Analyse erfolgt neben einer Analyse der (internen) Stärken und Schwächen zudem eine (externe) Chancen-Risiko-Analyse. Die identifizierten Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken werden in Matrixform dargestellt (27).

Durch die Studienbearbeiter wurde zunächst, basierend auf bisherigen Studien zu SL-Anwendungen, eine vorläufige SWOT-Matrix erstellt, welche als Vorbereitung für den ersten studienbegleitenden Workshop diente. Im nächsten Schritt wurde im Rahmen des Workshops am 20. April 2015, gemeinsam mit den Mitgliedern des Studienbeirats, eine weitere SWOT-Matrix erarbeitet. Anschließend wurden beide Matrizen durch den Studienbearbeiter abgeglichen und überarbeitet sowie auf Basis weiterer Expertengespräche ergänzt. Während des zweiten studienbegleitenden Workshops am 20. Juli 2015 wurden die identifizierten Chancen und Risiken zur Diskussion gestellt, um Maßnahmen abzuleiten und zu priorisieren.

Die sich ergebende SWOT-Matrix ist in Abbildung A03 dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Vielzahl an Stärken und Schwächen von SL-Batterien identifiziert werden konnten. Als Stärken sind, neben der Verlängerung der Lebensdauer in stationären und mobilen Anwendungen, die positiven Auswirkungen auf die Umwelt sowie Ressourcenverfügbarkeit zu nennen. Zudem besteht durch Verlängerung der Wertschöpfungskette die Möglichkeit, zusätzliche Erlöse zu generieren bzw. Kosten einzusparen. Demgegenüber steht die Unsicherheit bezüglich des Zustands nach der Erstanwendung sowie hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und der Lebensdauer in der Zweitanwendung. Zudem bestehen Bedenken hinsichtlich der Sicherheit und der mit SL-Batterien verbundenen Aufbereitungskosten.

Weiterhin konnten (externe) Chancen und Risiken identifiziert werden. Zu den Chancen für SL-Batterien sind der wachsende Marktanteil der Elektromobilität sowie der stationären Energiespeicherung zu zählen. Zudem könnten sich ein steigendes Umwelt- und Ressourcenbewusstsein sowie die Verzögerung der anfallenden Recyclingkosten positiv auf SL-Anwendungen auswirken. Auch stellen die staatliche Förderung von SL-Projekten und die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle Chancen dar. Eine weitere Chance besteht in der Berücksichtigung des Aufbereitungsprozesses in der Entwicklungsphase der Batterien im Sinne eines „Design-for-Second-Life“. Als Risiken wurden der aktuell noch sehr kleine Marktanteil der Elektromobilität und daher die geringe Verfügbarkeit von gebrauchten LITB identifiziert. Weitere

**A03:** Ergebnisse der SWOT-Analyse von Second-Life-Batterien

Risikofaktoren sind die Unsicherheit bzgl. der Preisentwicklung von Neubatterien und ggf. die fehlende Zahlungsbereitschaft für gebrauchte Batterien. Aufgrund der frühen Phase von SL-Batterien sind zudem die unklare Rechtssituation sowie die fehlende Standardisierung als Risiken zu sehen. Weiterhin ist die Entwicklung der Recyclingkosten ein wichtiger Faktor, der die Wirtschaftlichkeit von SL-Batterien sowohl positiv als auch negativ beeinflussen kann.

Die Ergebnisse der SWOT-Analyse zeigen, dass eine nähere Untersuchung von SL-Batterien und deren Umfeld notwendig ist, um das Potenzial möglicher SL-Anwendungen zu bewerten. Daher wird im Folgenden auf Basis einer Analyse des Umfelds sowie unter Berücksichtigung der technischen Randbedingungen und des Alterungsverhaltens der Batterien eine wirtschaftliche und ökologische Bewertung ausgewählter SL-Konzepte durchgeführt.

# 6 Umfeldanalyse

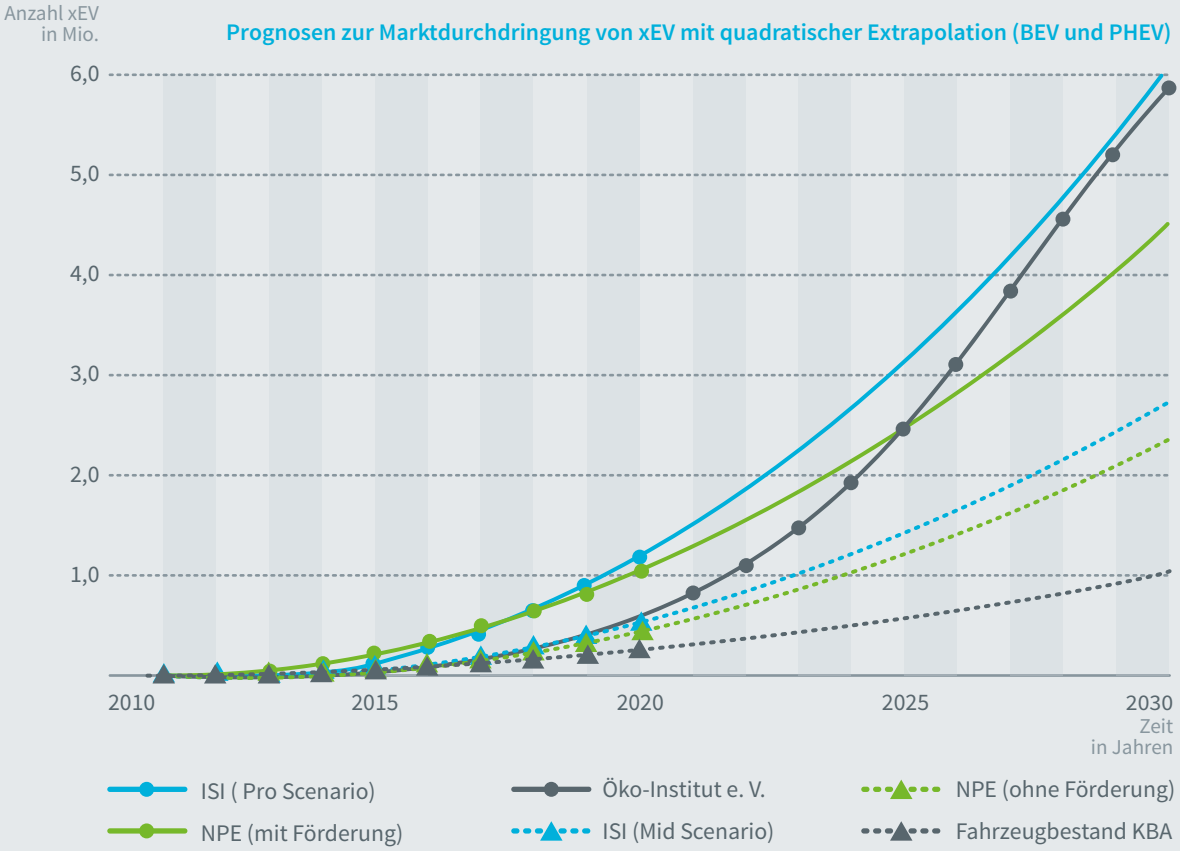
Die zukünftigen Einsatzmöglichkeiten von SL-Batterien hängen von vielen Einflüssen und Entwicklungen, auch außerhalb des Batteriesektors, ab. Im Folgenden soll auf die zwei wesentlichen Einflüsse, die Marktentwicklung der Elektromobilität in Deutschland und die damit verbundene Batteriepreisentwicklung, eingegangen werden. Bei den prognostizierten Fahrzeugzahlen der einzelnen Studien handelt es sich stets um BEV und PHEV (Plug-In Hybrid).

## 6.1 Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen

Maßgeblich für den zukünftigen Einsatz von SL-Batterien ist die Verfügbarkeit gealterter bzw. ausgedienter Traktionsbatterien. Folglich ist der Markt für SL-Batterien direkt von der Marktentwicklung von BEV abhängig. Aktuelle Entwicklungen und Prognosen hierzu werden im Folgenden vorgestellt.

Grundsätzlich kann die Marktentwicklung von xEV anhand verschiedener Faktoren abgeschätzt werden. In (28) wurde ein Stufenmodell entwickelt, in dem die ausschlaggebenden Einflüsse auf die potenzielle Marktdurchdringung von xEV priorisiert wurden. Als wichtigstes Kriterium gilt die Verfügbarkeit von xEV auf dem Markt. Erst durch ein ausreichendes Fahrzeugangebot in den unterschiedlichen Segmenten kann der Massenmarkt bedient werden. Die Alltagstauglichkeit stellt den zweitwichtigsten Einflussfaktor dar. Zentrale Themen wie Reichweite pro Batterieladung (zu erbringende Tagesfahrleistung) oder Platzverfügbarkeit im Fahrzeug (Einschränkungen bezüglich des Transports von Personen oder Gütern) spielen dabei eine Rolle.

Weiterhin gilt die Wirtschaftlichkeit von xEV gegenüber den Benzin- und Dieselfahrzeugen als wesentliches Kriterium für die Marktdurchdringung. In den meisten Studien werden TCO-Rechnungen für die verschiedenen Antriebskonzepte zugrunde gelegt, in der die Anschaffungs- und Nutzungskosten verglichen werden. In (29) und (30) wurde gezeigt, dass die Wirtschaftlichkeit stark vom individuellen Nutzungsprofil abhängt. Die höheren Anschaffungskosten eines BEV oder PHEV können nur durch eine hohe Fahrleistung amortisiert werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse aktueller Studien zu diesem Thema vorgestellt. Die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) hat in ihrem zweiten Bericht (31) ein Szenario zur Marktentwicklung von xEV entworfen. Dabei wird die Entwicklung des Fahrzeugbestands von xEV inklusive PHEV bis 2020 auf eine Million Exemplare geschätzt. Hierbei wird allerdings davon ausgegangen,




**A04:** Prognosen zur Marktdurchdringung von xEV mit quadratischer Extrapolation (BEV und PHEV) (36)

dass Anreizmechanismen bestehen, die die Marktdurchdringung von xEV begünstigen sollen. Sollte dies nicht erfolgen, wird von einem Fahrzeugbestand etwa in halber Größe (ca. 450000 Stück) ausgegangen. Weiterhin wird prognostiziert, dass für PHEV ein größerer Marktanteil zu erwarten ist.

Ein weiteres Szenario von Shell Deutschland (32) sowie eine gemeinsame Studie des Öko-Instituts e. V. mit dem Institut für sozial-ökologische Forschung Frankfurt (33) gehen von ähnlichen Entwicklungen aus. Das Fraunhofer-Institut ISI stellt drei verschiedene Prognosen auf (34), wobei das Contra-Elektromobilität-Szenario, aufgrund von offensichtlich unplausiblen Zahlen (keine BEV bis 2017, tatsächlich waren Anfang 2014 laut (35) schon 12156 Elektrofahrzeuge vorhanden) von der Auswertung ausgeschlossen wird. Hieraus lassen sich die in Abbildung A04 dargestellten Entwicklungspfade der Marktdurchdringung ableiten.

Aus den Szenarien der Studien wurden die Fahrzeugzahlen bis 2030 quadratisch extrapoliert. Von dämpfenden Einflüssen wurde in diesem Zeitraum nicht ausgegangen, da sich der Markthochlauf auch 2030 noch im Anfangsstadium befindet (< 15 % Marktanteil). Langfristig ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Fahrzeugzahlen in einen Sättigungsbereich entlang einer Sigmoid-Kurve entwickeln, womit auch dämpfende Effekte wie Fahrzeugabmeldungen und eine sukzessive Marktdeckung berücksichtigt werden müssten.

Aktuelle Zulassungszahlen des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) zeigen weiterhin einen Aufwärtstrend bei Elektrofahrzeugen mit einem mittleren Zuwachs von 24 % (Januar bis August 2015) im Vergleich zu 2014. Bei PHEV ist eine deutlich stärkere Steigerung von 225 % im Vergleich zum Vorjahr zu verzeichnen, so dass erstmals mehr PHEV als reine BEV verkauft wurden. Insgesamt sind die Fahrzeugzahlen jedoch noch auf einem geringen Niveau, so wurden bis einschließlich August in 2015 etwa 6456 BEV und 6493 PHEV zugelassen. Bei jährlich etwa 3 Mio. PKW-Zulassungen entspricht dies einem Marktanteil von ca. 0,3 %. Derzeit ist daher für die Elektrofahrzeugdurchdringung eher von einem der unteren Verläufe in Abbildung A04 auszugehen. Die unterste Kurve stellt eine mögliche Entwicklung basierend auf den aktuellen KBA-Zahlen dar.

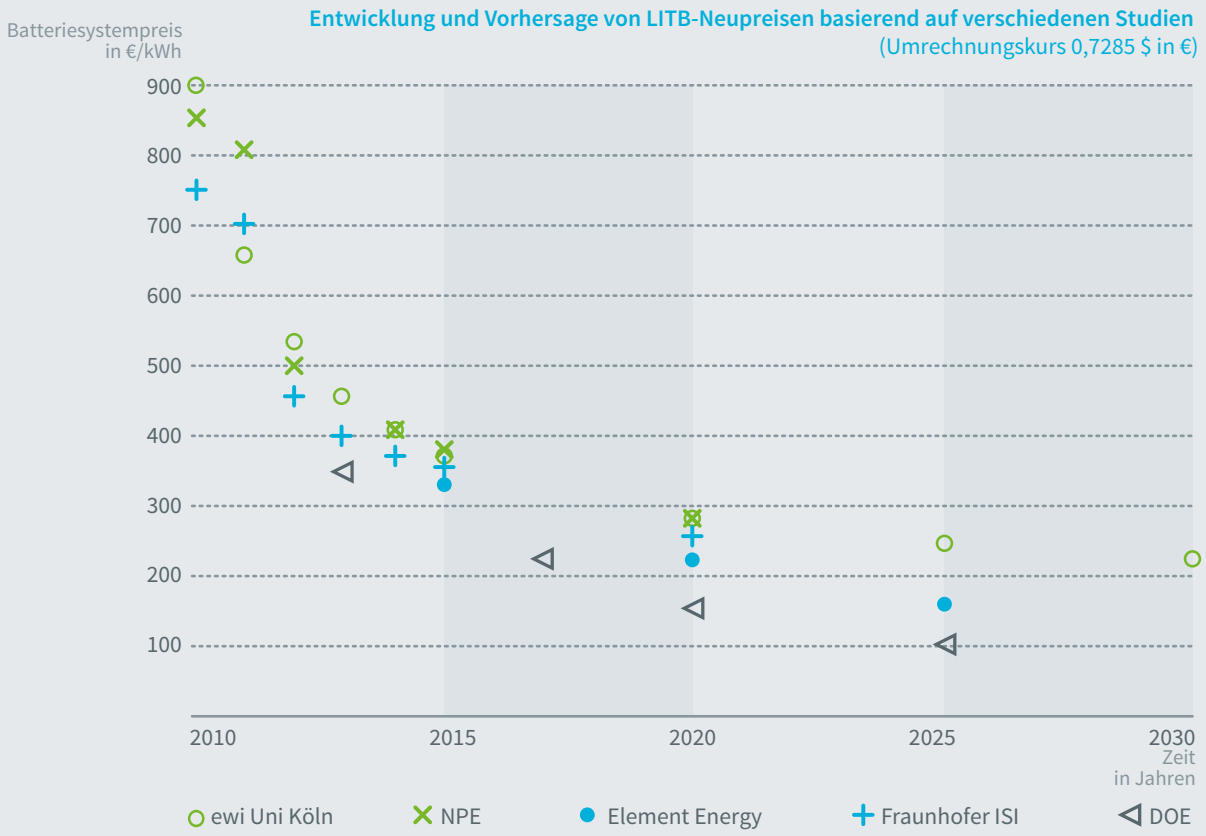
## 6.2 Batteriekostenentwicklung

Da sich der Restwert ausgedienter LITB stets an den Batterieneupreisen orientiert, ist deren Entwicklung ein wichtiger Einflussfaktor für die wirtschaftliche Bewertung von SL-Batterien. Im Folgenden werden mögliche Entwicklungspfade von BEV-Batteriesystempreisen und deren Einflüsse diskutiert.

Das Batteriesystem umfasst neben dem eigentlichen elektrochemischen Speicher auch ein Gehäuse, elektrische Verbindungen und Anschlüsse sowie ein Temperatur-Kontrollsystem, eine Messwerterfassung inklusive Batteriemanagementsystem und weitere Bauteile. Die Kosten für diese zusätzlichen Komponenten betragen etwa 25–30 % der gesamten Batteriesystemkosten (37) (38).

Da Traktionsbatteriekosten von Fahrzeugherstellern i. d. R. nicht veröffentlicht werden, sind Angaben dazu stets mit Unsicherheiten behaftet. Dass die Batteriekosten in Zukunft weiter sinken werden, davon gehen zahlreiche Studien aus. Meist werden dabei eine fortschreitende technologische Entwicklung sowie erhöhte Produktionsraten, die durch den steigenden Anteil an BEV induziert werden, unterstellt. Durch den wachsenden Markt können zudem die Fertigungsprozesse optimiert werden. Werden Batterien in Massenproduktion hergestellt, sinken die Herstellungskosten aufgrund von Skaleneffekten stark. A.T. Kearney (39) erwarten ein Wachstum des globalen Marktes von 30 % pro Jahr.

Weiterhin kann mit der Steigerung der Energiedichte eine Senkung der spezifischen Batteriekosten einhergehen. Durch größere Speicherkapazitäten bei gleicher Masse könnten die spezifischen Materialkosten sinken. Des Weiteren wird weniger Gehäusematerial benötigt. Mögliche Preispfade für




**A05:** Entwicklung und Vorhersage von LITB-Neupreisen basierend auf verschiedenen Studien (Umrechnungskurs 0,7285 $ in €) (37) (40) (34) (41) (42)

Batteriesysteme, die von unterschiedlichen Instituten und Unternehmen entwickelt wurden, sind Abbildung A05 zu entnehmen. (40) (34) (41) (37) (42). In Anlehnung an (36) wurden die in US-Dollar angegebenen Verläufe mit einem Kurs von 0,7285 in Euro umgerechnet (Wert vom 25.03.2014). Es gilt zu beachten, dass der Umrechnungskurs starken Schwankungen unterliegt. Bei einem aktuellen Umrechnungskurs von etwa 0,88 würden die Ergebnisse von Element Energy und dem US Department of Energy (DOE) um den entsprechenden Faktor höher liegen.

Bereits in 10 Jahren geht das DOE dabei von einem Batteriesystempreis von unter 100 €/kWh aus. Deutlich konservativer hingegen schätzt den Preisrückgang das energiewirtschaftliche Institut (ewi) der Universität Köln ein, dieses geht auch in 2030 noch von einem Wert leicht über 200 €/kWh aus. Aufgrund der zunehmenden Unrentabilität von SL-Konzepten bei zukünftig stark sinkenden Batteriesystempreisen wird in folgenden Berechnungen sowohl ein „Best-Case“ mit einem LITB-Neupreis $K_{Neu}$ basierend auf den Werten des ewi aus (40) angesetzt (ab 2030 wird der Wert dabei als konstant angenommen), als auch ein „Worst-Case“ mit den Werten des DOE betrachtet.

Björn Nykvist und Måns Nilsson haben in ihrem 2015 veröffentlichten Paper (43) die Daten von über 80 verschiedenen Quellen zu Batteriepreisen von BEV ausgewertet. Die Daten wurden separat für die gesamte Branche, nur für die marktführenden Hersteller sowie für die Differenz der beiden

Gruppen ausgewertet. Der Lerneffekt wurde mittels Daten aus verschiedenen Quellen modelliert. Nach den in dem Paper erwähnten Schätzungen machen die Batteriekosten derzeit rund 25 % der Gesamtfahrzeugkosten aus. Als mögliche Gründe für die Preisabnahmen werden die steigenden Verkaufszahlen und Lerneffekte bei der Herstellung aufgeführt.

## 6.3 Verfügbarkeit von Second-Life-Batterien

Sofern sich xEV etablieren, werden sich wie bei konventionellen PKW entsprechende Rücklaufzahlen einstellen und somit gebrauchte LITB verfügbar, die einem Wiederaufbereitungs- oder Entsorgungsprozess zugeführt werden müssen. Eine hohe Rücklaufzahl von xEV ist für einen wachsenden SL-Batteriemarkt von höchster Bedeutung. In Deutschland werden derzeit mehr als doppelt so viele PKW abgemeldet als neu zugelassen (in 2014 8,14 Mio. PKW-Außerbetriebsetzungen (35)). Im Vergleich dazu wurden in 2014 3443 Elektrofahrzeuge außer Betrieb gesetzt, was einem Anteil von 40 % der Neuzulassungen entspricht (44). Da Elektrofahrzeuge noch relativ neu auf dem Markt sind und die erwartete Lebensdauer oft noch nicht erreicht haben, ist in den nächsten Jahren mit einem größeren Anteil an Abmeldungen zu rechnen. Die Anzahl an gebrauchten LITB steigt in Abhängigkeit des Markthochlaufs (vgl. Abbildung A04).

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Verfügbarkeit von SL-Batterien hier hersteller- und modellübergreifend gemeint ist. Da keine Standardisierungen für Bauform, Verschaltung, Spannung etc. von LITB existieren, ist davon auszugehen, dass sich die verfügbaren SL-Batterien hinsichtlich dieser Kriterien unterscheiden. Für eine kosteneffiziente Produktion von SL-Anwendungen wird dies wahrscheinlich ein Hemmnis darstellen, da ggf. für jedes Modulkonzept eine eigene Lösung entwickelt werden muss. Für höhere Produktionsraten sind jedoch SL-Batterien vom gleichen Typ sinnvoll, da nur so standardisierte und damit kosteneffiziente Produktionsprozesse entwickelt werden können. Die Verfügbarkeit von SL-Batterien reduziert sich in diesem Fall auf die Rücklaufquoten einzelner Hersteller.

Weiterhin hängt die Verfügbarkeit von SL-Batterien von der Nutzungsdauer im Fahrzeug und dem Zustand der Batterie am Ende der Nutzungsphase ab. Auf diesen Aspekt wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

# 7 Alterung und Wiederaufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien

Um die Wirtschaftlichkeit von SL-Anwendungen beurteilen zu können, muss insbesondere das Alterungsverhalten der weiterverwendeten Traktionsbatterien verstanden sowie vorhergesagt werden können. Das Alterungsverhalten in der SL-Anwendung bestimmt dabei den zu erzielenden Erlös, insbesondere durch die erforderliche Anzahl an Batteriewechseln im jeweiligen Betrachtungszeitraum und fließt daher direkt in die Investitionen und somit auch in die Investitionsentscheidung mit ein. In diesem Kapitel sollen die Grundlagen der Alterung von LIZ kurz erläutert sowie speziell auf einige daraus resultierende Hürden bzgl. der Umsetzbarkeit von SL-Konzepten eingegangen werden. Es wird dabei von den grundlegenden Zusammenhängen der Alterung auf Zellebene auf die Batteriesystemalterung geschlossen.

## 7.1 Definition notwendiger Batterieparameter

Zunächst werden sämtliche für die folgenden Darstellungen notwendigen Batterieparameter definiert. Im technischen Umfeld (z. B. in Datenblättern) ist der Ladezustand (SoC) einer Batterie wie folgt definiert, wenn Verluste durch Selbstentladung vernachlässigt werden:

$$SoC(t) = \frac{1}{C_{aktuell}} \cdot \int_{t=t_0}^{t_1} I(\tau) d\tau$$

wobei $C_{aktuell}$ die aktuelle Kapazität und I(t) die Stromstärke bezeichnet. Diese Formel beschreibt das „Ah-Zählen“ und setzt die aktuell eingeladene Ah-Menge ins Verhältnis zur aktuell verfügbaren Kapazität C (in Ah). Der SoC ist daher einheitslos und bewegt sich im Intervall zwischen 0 % (vollständig entladen) und 100 % (vollständig geladen). Für neue Zellen bzw. Batterien wird für $C_{aktuell}$ entweder die Nennkapazität $C_N$ oder die exakte Kapazität im Neuzustand $C_{Neu}$ herangezogen. In jedem Fall müssen diese Werte mit voranschreitender Alterung angepasst werden. Die Entladetiefe (DoD) ist gemäß DoD(t) = 100 % – SoC(t) definiert und beschreibt die Tiefe eines Entladevorgangs beginnend bei einem SoC = 100 %. Wird hingegen ein Entladevorgang nicht aus dem Volllladezustand begonnen, so lässt sich der DoD gemäß DoD(t) = $SoC_{Start}$ – SoC(t) und der Bedingung, dass dieser keine negativen Werte annehmen kann, beschreiben. Das Intervall des DoD umfasst ebenfalls Werte zwischen 0 % und 100 %. Üblicherweise wird die Angabe eines DoD um einen mittleren SoC ergänzt, um die obere sowie untere Ladezustandsgrenze ($SoC_{Start}$ bzw. SoC(t)) direkt schlussfolgern zu können. Analog hierzu beschreibt die Ladeschluss- bzw. Entladeschlussspannung den Spannungswert, bis zu dem geladen bzw.

entladen wird (bei LIZ oft 4,2 V bzw. 3,0 V). Bei einem SoC = 50 % liegt i. d. R. näherungsweise die Nennspannung $U_N$ vor (bei LIZ oft 3,7 V). Die Stromstärke in Lade- sowie Entladerichtung wird für Batterien häufig als C-Rate angegeben: Eine C-Rate = 1 würde hierbei bedeuten, dass eine Batterie innerhalb einer Stunde vollständig entladen bzw. geladen wird. Für eine LIZ mit einer Nennkapazität $C_N$ = 2 Ah wäre demnach eine C-Rate = 1 gleichbedeutend mit einer Stromstärke von 2 A. Eine C-Rate = 0,5 bzw. 2 etc. würde das Entladen bzw. Laden einer Batterie innerhalb 2 Stunden bzw. 0,5 Stunden usw. bedeuten. Der SoH einer Batterie ist durch das Verhältnis von $C_{aktuell}$ zu $C_{Neu}$ oder $C_N$ gegeben und beschreibt den aktuellen Alterungszustand. Sobald ein bestimmter SoH erreicht wird, ab dem die Anforderungen einer Anwendung von der Batterie nicht mehr erfüllt werden können, liegt das EoL-Kriterium vor und die Batterie muss durch eine neue ersetzt werden.

Im energiewirtschaftlichen Umfeld werden Kapazitäten jedoch in Wh angegeben, statt Strömen wird mit Leistungen gerechnet. In der oberen Formel des SoC(t) müsste demnach ebenfalls der Strom im Integral durch Leistung ersetzt werden, um wieder einen einheitslosen Wert zu erhalten. Technisch gesehen wird der Zusammenhang zwischen Energie (in Wh) und Kapazität (in Ah) durch $E = C \cdot U$ beschrieben. Wird eine ideale Batterie mit konstantem $U_N$ im ganzen Ladezustandsbereich angenommen, unterscheiden sich die Parameter in den unterschiedlichen Darstellungen nicht. Bei nicht idealen Bedingungen muss beachtet werden, dass z. B. bei konstanter Entladeleistung gemäß $P = U \cdot I$ der Strom mit sinkendem Ladezustand aufgrund der Spannungscharakteristik einer Batterie ansteigt. Simultan zur Definition der C-Rate im technischen Umfeld bedeutet z. B. eine C-Rate = 1 im energiewirtschaftlichen Jargon für eine Batterie mit 20 kWh Speicherkapazität eine Lade- bzw. Entladeleistung von 20 kW.

Es muss daher in den folgenden Kapiteln bedacht werden, dass gleich bezeichnete Parameter in den folgenden Kapiteln nicht exakt gleich definiert sind, dies aber für die Auswertungen näherungsweise angenommen werden darf. In diesem Kapitel werden das Alterungsverhalten von LIB auf Zellebene und die dafür verantwortlichen Alterungsmechanismen etc. beschrieben, weswegen die verwendeten Batterieparameter stets nach den Definitionen aus dem technischen Umfeld zu interpretieren sind. Zudem sei hier darauf hingewiesen, dass eine Traktionsbatterie ein „Vielzellsystem“ darstellt und dies das Alterungsverhalten der einzelnen Zellen möglicherweise beeinflusst (siehe Kapitel 7.4).

## 7.2 Alterungsmechanismen und -verhalten

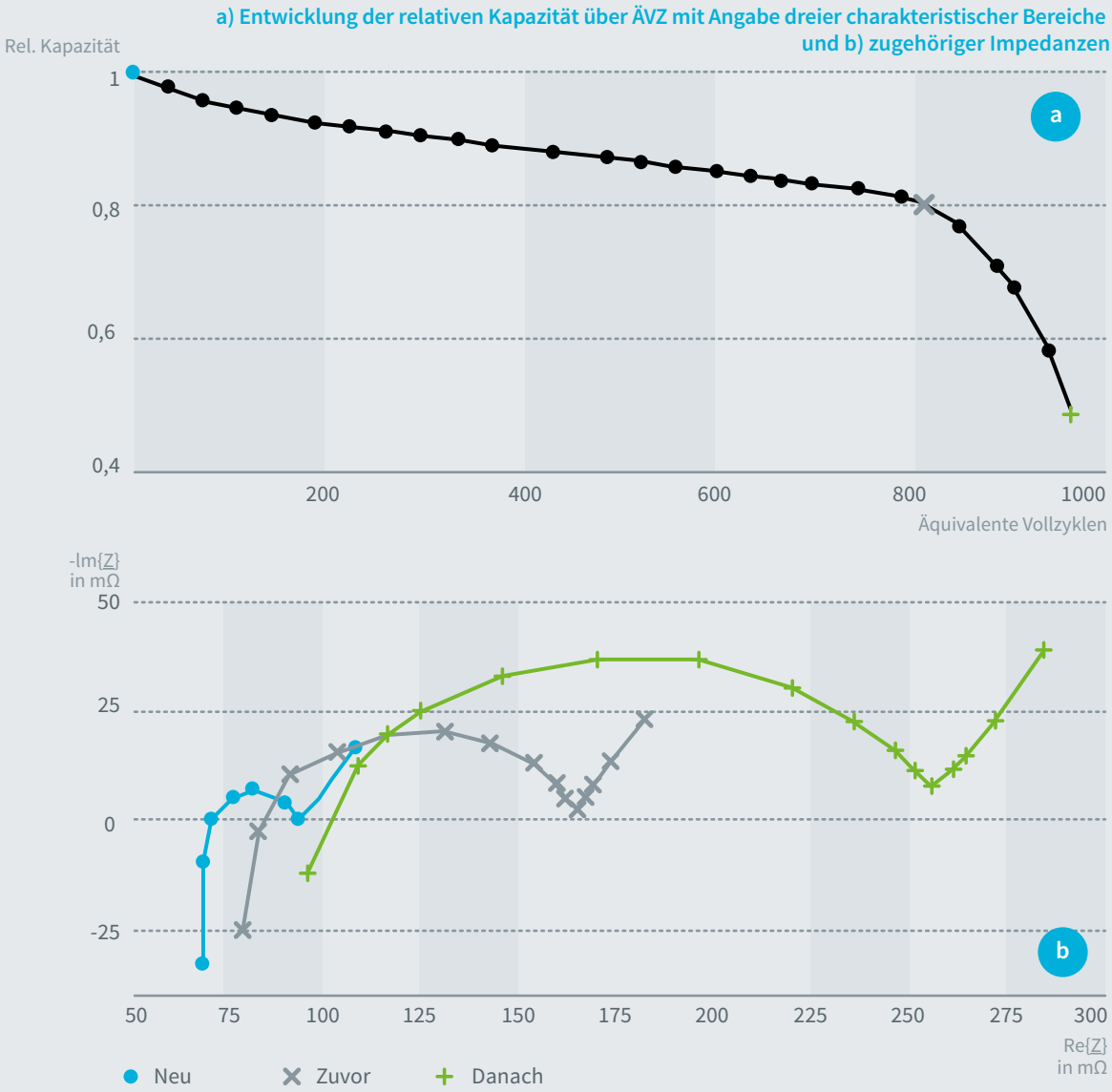
Grundsätzlich wird bei der Alterung von LIZ zwischen der kalendarischen und der zyklischen Alterung unterschieden. Bei der kalendarischen Alterung, d. h. während Zeiten, in denen der Batteriespeicher inaktiv ist, begünstigen vor allem hohe SoC sowie hohe Temperaturen einen beschleunigten Alterungsfortschritt. Die zyklische Alterung wird durch die Höhe der C-Raten (besonders in Laderichtung), den DoD (bzw. Ladeschluss- und Entladeschlussspannung) sowie der Temperatur maßgeblich beeinflusst. Als Folgen der kalendarischen sowie zyklischen Alterung von LIZ ergeben sich eine Abnahme der Kapazität, eine erhöhte Impedanz sowie eine durch die daraus resultierende erhöhte Polarisation verringerte Leistungsfähigkeit. Als Ursachen für diese Alterungsfolgen können im Wesentlichen drei Gruppen aufgezählt werden: Aktivmaterialverlust, Lithiumverlust und eine verschlechterte ionische Leitfähigkeit (45).

Eine Schlüsselrolle im Alterungsverhalten von LIZ nimmt die Entwicklung einer sich zwischen Anode und dem Elektrolyten ausbildenden Passivschicht ein (46). Die sich während des ersten Zyklus (Formierungszyklus) ausbildende „Solid Electrolyte Interphase“ (SEI) unterbindet fortan idealerweise jegliche Zersetzungsreaktionen des Elektrolyten in der Grenzschicht zwischen Anode und Elektrolyt. Allerdings unterliegt diese Passivschicht einem ständigen Entwicklungsprozess, der z. B. bei hohen SoC oder Temperaturen eine Verdickung bewirkt, oder als Folge eines Aufplatzens der Passivschicht durch zu hohe C-Raten oder DoD neu ausgebildet werden muss (47) (48). Da bei einer Verdickung bzw. Neuausbildung der Schicht stets aktives Lithium verbraucht wird, korreliert dies mit einem Kapazitätsverlust der betroffenen LIZ (49) (50) (51) (52) (53). Obwohl die SEI elektronisch isolierend, aber leitfähig für Lithium-Ionen ist, muss eine Verdickung als zusätzliches „Hindernis“ für Lithium-Ionen verstanden werden, welches sich neben dem Kapazitätsverlust zudem in Form einer erhöhten Impedanz äußert.

Neben der Entwicklung der SEI kommt es in LIZ zu einer Fülle von weiteren Alterungsmechanismen, von denen die wichtigsten hier aufgezählt werden. Zudem wird auf fortführende Literatur verwiesen. Neben der SEI kommt es auch in der Grenzschicht zwischen Kathode und dem Elektrolyten zur Ausbildung einer Passivschicht, der so genannten „Solid Permeable Interphase“ (SPI), die ähnlich aufgebaut ist, aber nicht vollständig elektronisch isolierend wirkt (46). Daher kommt es in der kathodischen Grenzschicht fortan zur Oxidation des Elektrolyten. Kathodenseitig können sich besonders bei hohen SoC irreversible Strukturumwandlungen im Aktivmaterial ergeben (54) (55). Den dabei in Lösung gehenden Oxidationsprodukten wird nachgesagt, eine katalytische Wirkung auf das SEI-Wachstum zu besitzen (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64). Durch das Ein- und

Auslagern von Lithium-Ionen in die Wirtsgitter der Aktivmaterialien während des Zyklisierens (so genannte Inter- oder Deinterkalationsvorgänge) tritt Volumenarbeit auf, z. B. 10,2 % in Graphitanoden und 3,4 % in Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid-Kathoden (NMC) (65) (66) (67). Als Folge dessen können sich Mikrorisse in den Aktivmaterialien ergeben oder auch leitende Verbindungen des Aktivmaterials zum Stromkollektor aufbrechen. Werden LIZ bei tiefen Temperaturen mit hohen C-Raten geladen (oder schlicht überladen), so kann es zu einer Abscheidung von metallischem Lithium zwischen Aktivmaterial und SEI kommen, dem so genannten „Lithium-Plating". Dieses tritt auf, sobald das Potential des Graphits unter 0 V vs. $Li/Li^+$ fällt (59) (68). Da dieser Alterungsmechanismus z. B. die Hitzeentwicklung während eines „Thermal Runaways" erhöhen kann, und somit als sicherheitskritisch zu bewerten ist, sollten zu hohe Laderaten in jedem Fall vermieden und eine geeignete Betriebstemperatur stets sichergestellt werden (69).

Während für den Kapazitätsverlust gelagerter LIZ meistens eine wurzelförmige Abhängigkeit von der Zeit angegeben wird, hängt die zyklische Alterung näherungsweise linear vom Ladungsdurchsatz ab (56) (63) (64) (70) (71). Entgegen dieser üblicherweise angenommenen Abhängigkeiten von Zeit und Ladungsdurchsatz wird in einigen Veröffentlichungen von einem plötzlich zunehmenden, abrupten Kapazitätsabfall in der Nähe des EoL berichtet, der die Vorhersage des Alterungsverhaltens erschwert. Das im Folgenden als „nichtlineares Alterungsverhalten" bezeichnete Alterungsphänomen gilt als ernstzunehmende Hürde bzgl. der Umsetzbarkeit von SL-Konzepten, da dadurch eine mögliche Weiterverwendung durch zu kurze Betriebszeiten vollständig unterbunden würde. Das nichtlineare Alterungsverhalten wurde bei LIZ mit unterschiedlichen Kathodenmaterialien beobachtet, z. B. NMC (63), Lithiumeisenphosphat (LFP) (62), Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA) (72) oder einer Mischung aus Lithiummanganspinell (LMO) und NMC (73). Da bei allen LIZ graphitbasierte Anoden verwendet wurden, liegt es nahe zu vermuten, dass ein anodenseitiger Alterungsmechanismus für das Auftreten des nichtlinearen Alterungsverhaltens verantwortlich ist. Abbildung A06 a) zeigt die Entwicklung der relativen Kapazität über äquivalenten Vollzyklen (ÄVZ), wobei bei der hier gezeigten Zelle eine Abkehr von linearem hinzu nichtlinearem Alterungsverhalten nach gut 800 ÄVZ und bei einer Restkapazität von ca. 80 % eintritt. Unter einem äquivalenten Vollzyklus wird allgemein ein Ladungsdurchsatz in doppelter Höhe der Nennkapazität verstanden. Abbildung A06 b) zeigt die entsprechenden Impedanzen in sog. Nyquist-Plots bezüglich der drei in Abbildung A06 a) markierten charakteristischen Alterungszustände: Neuzustand, Zellen direkt vor dem Eintreten des nichtlinearen Alterungsverhaltens bzw. danach. In Abbildung A06 b) fällt auf, dass die Zunahme der Impedanz zwischen Neuzustand und vor dem Knick weit geringer ist als danach, was prinzipiell dem Verhalten der Kapazität




**A06:** a) Entwicklung der relativen Kapazität über ÄVZ mit Angabe dreier charakteristischer Bereiche und b) zugehöriger Impedanzen (76)

aus Abbildung A06 a) entspricht. Der verwendete Zelltyp besteht aus einer Graphitanode sowie NMC-Kathode.

Für die Umsetzbarkeit eines SL-Konzepts ist es als kritisch zu erachten, dass das Eintreten des nichtlinearen Alterungsverhaltens im Beispiel in AbbildungA06 a) bereits bei einer Restkapazität von ca. 80 % startet. In weiterer Fachliteratur wurde ein solcher Wendepunkt ebenfalls bei Restkapazitäten von ca. 80 % bzw. erhöhten ohmschen Widerständen von ca. 150 % beobachtet (63) (72). Hinsichtlich der Ursachen wird vermutet, dass insbesondere der Verbrauch von aktivem Lithium durch das Wachstum der SEI sowie Graphit-Aktivmaterialverlust die wesentlichen Alterungsmechanismen im linearen Bereich darstellen (61) (63) (64) (72) (62) (74) (75). Zudem wird davon ausgegangen, dass die Abkehr von linearem hinzu nichtlinearem Alterungsverhalten durch die Abscheidung von metallischem Lithium, d. h. Lithium-Plating, bewirkt wird (50) (62) (63) (65) (72). Trotz

moderater Laderaten sowie Temperaturen kann Lithium-Plating durch eine verschlechterte ionische Leitfähigkeit (z. B. hervorgerufen durch starkes Passivschichtwachstum) oder Graphit-Aktivmaterialverlust bei bereits stark vorgealterten LIZ auftreten.

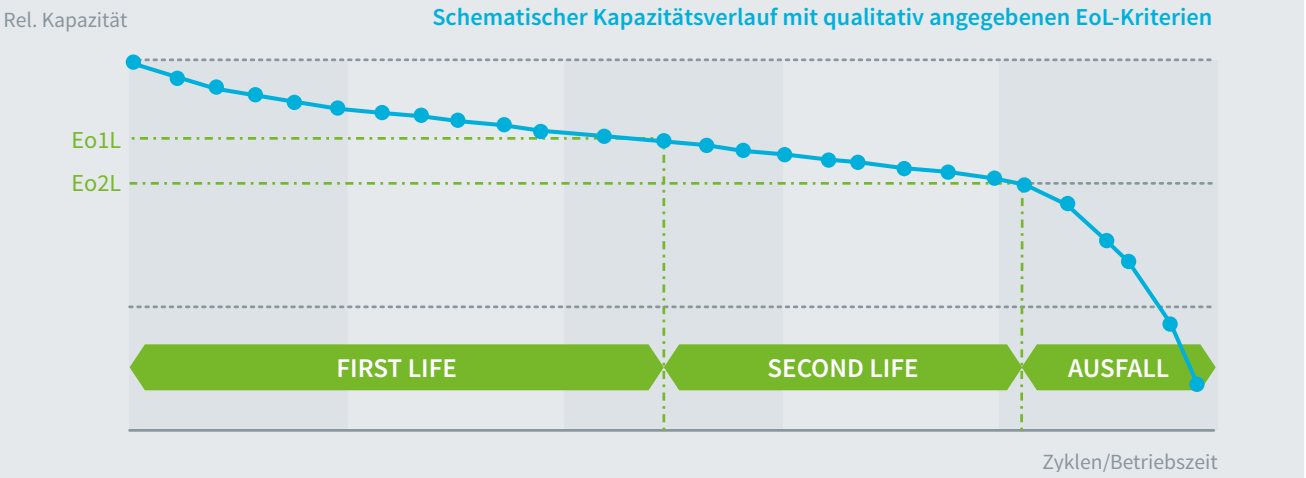
Da ein frühzeitiges Eintreten des nichtlinearen Alterungsverhaltens bereits bei Restkapazitäten von ca. 80 % eine Weiterverwendung in SL-Konzepten unwirtschaftlich erscheinen lässt, wurden in (76) Möglichkeiten untersucht, dessen Auftreten hinauszuzögern oder sogar gänzlich zu verhindern. Es konnte dabei gezeigt werden, dass nichtlineares Alterungsverhalten bei hohen Laderaten oder Entladetiefen beschleunigt auftritt. Bezüglich der Temperatur wurde festgestellt, dass tiefe Temperaturen besonders kritisch zu bewerten sind, aber auch zu hohe Temperaturen das Auftreten der nichtlinearen Alterung begünstigen – es liegt demnach ein Temperaturoptimum vor (35 °C bei dem in (76) untersuchten Zelltyp). Im Umkehrschluss bedeutet das, dass durch niedrige Laderaten, niedrige DoD sowie Zyklisieren bei einem Temperaturoptimum das Auftreten des nichtlinearen Alterungsverhaltens verzögert oder sogar verhindert werden kann. In (76) konnte das nichtlineare Alterungsverhalten durch eine geringere Laderate gänzlich vermieden werden, weswegen diesem Parameter der größte Einfluss (ggf. zellspezifisch) eingeräumt wird. Durch einen geringeren DoD sowie dem Zyklisieren bei einem Temperaturoptimum konnte das Eintreten zumindest hinausgezögert werden. In Bezug auf die Umsetzbarkeit von SL-Konzepten muss in der Praxis gezeigt werden, dass das Eintreten des nichtlinearen Alterungsverhaltens vermieden bzw. hinausgezögert werden kann, indem kurz vor dessen Eintreten von einer höheren Last (z. B. eines elektrischen Fahrzeugs) auf eine mildere (z. B. stationärer Speicher) gewechselt wird. Notwendige Bedingung dafür wäre, dass die Batteriehistorie (Lastprofile, Umgebungsbedingungen, etc.) nur bedingt einen Einfluss auf das Eintreten des nichtlinearen Alterungsverhaltens hat, und demnach auch bei vorheriger hoher Last unterdrückbar ist. Im Rahmen der Berechnungen in dieser Studie wird angenommen, dass diese Anforderung erfüllt ist und durch die Weiterverwendung der Traktionsbatterie in einer SL-Anwendung die nichtlineare Alterung aufgrund der Lastreduktion **nicht** eintritt.

## 7.3 „End of Life“-Kriterien

Das Eintreten des nichtlinearen Alterungsverhaltens bei einer Restkapazität von ca. 80 %, wie in Abbildung A06 a) dargestellt, würde in der Praxis jegliche Weiterverwendung gealterter Traktionsbatterien in einer SL-Anwendung unterbinden. Üblicherweise wird der E01L im Fahrzeugbetrieb bei Restkapazitätswerten zwischen 70 % und 80 % angesetzt (9) (11)

(12) (13) (77) (78) (79) (80). Im „Electric Vehicle Battery Test Procedures Manual“ des USABC wurde erstmals 1996 ein lediglich als grober Richtwert zu verstehender E01L = 80 % angegeben. Dieser Wert wird bis heute in beinahe allen Publikationen angenommen bzw. nur leicht variiert, eine Evaluierung wurde hingegen nicht durchgeführt. In (81) wird jedoch angemerkt, dass bei 80 % Restkapazität der Traktionsbatterie eines Mittelklassewagens ein Anteil von 4 % der Fahrer in den USA ihre täglichen Fahrten nicht mehr bewerkstelligen können. Bei Restkapazitäten von 70 %, 60 % und 50 % steigt dieser Anteil jeweils auf ca. 7 %, 11 % und 17 % an. Prinzipiell müsste das E01L-Kriterium also stets nutzerabhängig definiert werden, was in der Praxis aber nicht umsetzbar ist. Deutlich praxistauglicher wäre es, sich an den Garantien der Fahrzeughersteller zu orientieren (11) (82). Ein namhafter deutscher und ein amerikanischer Hersteller garantieren derzeit eine Restkapazität von mindestens 70 % bzw. 80 % nach 8 Jahren Betriebszeit (83). Obwohl das E01L = 80 % prinzipiell in Frage gestellt werden sollte, und dieses Kriterium in der Praxis wohl eher subjektiv vom jeweiligen Endnutzer bestimmt wird, verständigte man sich in einem der studienbegleitenden Workshops darauf, eben diesen Wert weiterzuverwenden, um eine optimale Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Publikationen gewährleisten zu können. Zudem sei hier erwähnt, dass neben einer zu geringen Kapazität auch die Reduktion der Leistungsfähigkeit dazu führen kann, dass die Anforderungen einer Anwendung nicht mehr erfüllt werden können und die Batterie ausgetauscht werden muss. Im Rahmen dieser Studie wird aber stets ein kapazitätsbezogener EoL verwendet.

Bezüglich des E02L-Kriteriums nach der SL-Anwendung fehlen jegliche konkrete Angaben in der Literatur. Lediglich in (14) wird ein mögliches Intervall für E02L zwischen Restkapazitäten von 20 % und 40 % angegeben, jedoch ohne diese Angabe näher zu begründen. Insbesondere sind diese Werte auf keine bestimmten SL-Anwendung abgestimmt, sondern lediglich als grobe Richtwerte zu verstehen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Kosten für die Peripherie eines Batteriesystems mit niedrigerem E02L-Kriterium steigen: Soll ein bestimmtes Lastprofil mit einer Batterie noch bewältigt werden können, bedeutet ein niedrigerer E02L eine größere (bzw. auch schwerere) Batterie, welche mehr Gehäuse, Kühlung etc. benötigen wird. Neben diesen wirtschaftlichen Aspekten kann auch ein physikalischer Aspekt aufgeführt werden: So sollte die Restkapazität, bei der nichtlineares Alterungsverhalten beginnt einzutreten, in jedem Fall als tiefstes E02L-Kriterium festgesetzt werden, da, wie zuvor erwähnt, dessen Ursache das als sicherheitskritisch einzustufende Lithium-Plating ist. Da weder aus den wirtschaftlichen noch aus den physikalischen Aspekten konkrete E02L-Kriterien ableitbar sind, wurde sich im Rahmen dieser Studie darauf geeinigt, sämtliche Berechnungen mit der konservativsten Annahme aus (14), d. h. einem E02L = 40 % durchzuführen.




**A07:** Schematischer Kapazitätsverlauf mit qualitativ angegebenen EoL-Kriterien

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung der untersuchten SL-Anwendung in dieser Studie wird daher ein $\Delta EoL = Eo1L - Eo2L = 80\ \% - 40\ \% = 40\ \%$ angenommen.

Abbildung A07 zeigt schematisch den aus Abbildung A06 bekannten Kapazitätsverlauf mit qualitativ angegebenen EoL-Kriterien. Durch den Austausch einer gealterten LITB und deren Weiterverwendung in einer SL-Anwendung mit milderem Lastprofil tritt nichtlineares Alterungsverhalten deutlich verzögert auf, die lineare Abhängigkeit (ggf. mit variierender Steigung) bleibt demnach während der SL-Anwendung bis zum Erreichen des „Wendepunkts“ zunächst erhalten. Kommt es schließlich trotz der milderen Last zum Kapazitätseinbruch, so sollte dies unmittelbar als Erreichen des Eo2L gewertet werden.

Theoretisch könnte eine kontinuierliche Lastreduktion (z. B. „Third Life“ mit noch geringeren Anforderungen, Hinzufügen zusätzlicher Batteriemodule, etc.) dieses Alterungsphänomen bis zu einer Restkapazität von 0 % verhindern. Dies ist aber in der Praxis aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll darstellbar. Hinzu kommt, dass auch der Wirkungsgrad der Batterien durch stärkere Polarisationsvorgänge stark abnehmen würde. Im Rahmen der in dieser Studie durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird hingegen ein konstanter (anwendungsspezifischer) Wirkungsgrad angesetzt. Ein möglichst hohes $\Delta EoL$ bewirkt in der Praxis eine lange Betriebszeit der SL-Batterie und somit eine maximale Ausschöpfung der zusätzlichen Wertschöpfung. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass dies ggf. nur aus Sicht des SL-Anwendungsbetreibers wirtschaftlich sinnvoll ist, es aber aus Sicht des Fahrzeughalters bzw. Fahrzeugherstellers evtl. von Vorteil wäre, die Traktionsbatterien bis zu tieferen Restkapazitäten im Fahrzeug zu belassen. Kann ein Fahrzeughalter seine täglichen Fahrten aufgrund der durch die Batteriealterung resultierenden limitierten Reichweite nicht mehr bewerkstelligen, so wäre eine Alternative zum SL-Konzept, das Fahrzeug an einen Nutzer mit einer geringeren Reichweitenanforderung weiterzuverkaufen. Ein solches Konzept widerspricht jedoch der in Kapitel 4 gegebenen (in diesem Studienbericht geltenden) Definition einer SL-Batterie und wird daher nicht weiter betrachtet.

## 7.4 Streuungsverhalten

Neben dem Auftreten des nichtlinearen Alterungsverhaltens ist auch die zunehmende Streuung von Zellparametern (Kapazität, Impedanz, etc.) mit fortschreitender Alterung als Hürde für die Umsetzung von SL-Konzepten zu nennen. Zwar ist es in der Praxis unwahrscheinlich, dass gealterte LITB bis auf Zellebene zerlegt und diese anschließend zu neuen SL-Batteriemodulen zusammengesetzt werden. Doch übersetzt sich die Streuung auf Zellebene direkt auf Batteriemodule, denn z. B. in einem seriellen Strang wird die Kapazität stets durch die schwächste Zelle bestimmt (84). Dies kann dazu führen, dass sich aus wirtschaftlicher Sicht lediglich eine Auswahl an Batteriemodulen aus ein und demselben Batteriepack als lohnenswert erweist, die restlichen Module für eine Wiederaufbereitung aber nicht in Frage kommen (74) (85) (86) (87).

Grundsätzlich kann eine Streuung von Zellparametern mit fortschreitender Betriebszeit des Batteriespeichers aus verschiedenen äußeren sowie inneren Einflüssen hervorgehen. Äußere Einflüsse stellen z. B. Temperaturgradienten im Batteriepack, unterschiedliche Kontaktwiderstände sowie die unterschiedlichen Effekte von Zellverschaltungstopologien dar (88). Als innerer Einfluss kann der Produktionsprozess selbst verstanden werden, bei dem es stets zu Schwankungen, z. B. in der Elektrodendicke oder Materialzusammensetzung, kommt (89) (90). Da keine LIZ einer anderen völlig gleicht, weist das Alterungsverhalten, selbst bei LIZ aus einer Charge, die unter kontrollierten Bedingungen mit demselben Lastprofil im Labor zyklisiert werden, eine gewisse Streuung auf (74) (85) (86) (87). Diese nur schwer vermeidbare Ursache der Zellstreuung wird dann in der Praxis durch äußere Einflüsse verstärkt.

In (91) wurden insgesamt 1908 LIZ nach dreijähriger Verwendung in zwei baugleichen BEV (d. h. 954 Zellen pro Fahrzeug) vermessen und mit 484 Zellen im Neuzustand verglichen (Graphitanode, NMC-Kathode). Die in der statistischen Analyse beobachteten Auffälligkeiten wurden durch Auswertung der mitgeloggten Fahrzeugdaten versucht zu erklären. Grundsätzlich konnte nachgewiesen werden, dass sich die Streuung der Zellparameter während des Alterungsfortschritts im BEV verglichen mit dem Neuzustand erhöht. Zudem wurde festgestellt, dass sich auch die Anzahl der Ausreißer erhöht, und dabei stets die Mehrheit Werte in Richtung stärkerer Alterung aufweist. Es konnte gezeigt werden, dass im Neuzustand Verteilungen von Kapazitätswerten sowie Impedanzanteilen gut durch die Normalverteilung beschreibbar sind. Während der Alterung wird die Verteilung der Kapazitätswerte aber zunehmend linksschief, bzw. bei Impedanzanteilen rechtsschief. Wird statt Impedanzanteilen der Kehrwert, d. h. die entsprechenden Admittanzanteile, herangezogen, so resultiert dies in einer Spiegelung der Verteilungen, wodurch diese wie die Kapazitätsvertei-

**A08:** Box-Plots zur Verdeutlichung der zunehmenden Streuung von Zellparametern während des Alterungsfortschritts (91)

lungen linksschief erscheinen. Aufgrund der Linksschiefe der Kapazitäts- sowie Admittanzverteilungen erwies sich im gealterten Zustand, d. h. nach drei Jahren Betrieb der Zellen in den beiden untersuchten elektrischen Fahrzeugen (BEV1, BEV2), die linksschiefe Weibullverteilung als ideal für deren Beschreibung.

Abbildung A08 fasst die beschriebenen Zusammenhänge, wie die allgemeine Zunahme der Streuung während der Alterung, die Zunahme an Ausreißern sowie den Trend zu linksschiefen Verteilungen bei Kapazitäten bzw. zu rechtsschiefen Verteilungen bei Impedanzanteilen, noch einmal graphisch in Box-Plots zusammen. Der Impedanzanteil $R_{zc}$ entspricht hierbei dem Realteil im Impedanzspektrum, bei dem der Imaginärteil null wird (oft als ohmscher Widerstand bezeichnet). Der Impedanzanteil $R_{pl+ct}$ beschreibt den Durchmesser des „Halbkreises“ im Nyquist-Diagramm und ist z. B. charakteristisch für Passivschichten sowie Ladungsdurchtritt.

Abschließend wurden die Auffälligkeiten aus der statistischen Untersuchung mit den geloggten Fahrdaten der Fahrzeuge verglichen, um z. B. Ausreißer mit Hot-Spots im Batteriepack zu erklären. In jedem Modul der

LITB waren dafür zwei Temperatur- sowie zwei Spannungssensoren angebracht. Fazit des Vergleichs war allerdings, dass die Zellstreuung sowie das Auftreten von Ausreißern nicht mit den geloggten Daten erklärbar ist und statt diesen äußeren Einflüssen (wie z. B. Temperaturgradienten im Pack) somit innere Einflüsse verantwortlich zu sein scheinen. Dies bedeutet, dass sich eine bereits im Neuzustand vorliegende Streuung durch geringfügige Unterschiede im Produktionsprozess während des Alterungsfortschritts zu vergrößern scheint.

Aufgrund der Tatsache, dass das Auftreten von Ausreißern bzw. der zunehmenden Zellstreuung während der Alterung von zellinterner Natur zu sein scheint und diese z. B. durch eine optimale Temperaturverteilung im Batteriepack nicht verhindert werden kann, ist es wesentlich, dass LITB von BMS effizient überwacht werden. Zudem wird durch die Nichtvermeidbarkeit einer zunehmenden Zellstreuung die Problematik hinsichtlich der Weiterverwendbarkeit von gealterten LITB-Modulen in SL-Anwendungen unterstrichen: Die Batterieeinheiten einer LITB müssen nach der Entnahme aus dem BEV i. d. R. aufwendig vermessen werden, um schwächere Einheiten auszusortieren und diese, anstatt unter zusätzlichen Kosten zu neuen SL-Batterien zusammenzusetzen, direkt in den Recyclingprozess zu geben.

## 7.5 Wiederaufbereitungsprozess

Wie zuvor erwähnt, bedeutet das nicht vermeidbare Auftreten zunehmender Zellstreuung während des Alterungsfortschritts, dass sich aus wirtschaftlicher Sicht ggf. nur einzelne Batterieeinheiten aus einer gealterten LITB für die Weiterverwendung in einer SL-Anwendung eignen. Idealerweise kann bereits durch das Auslesen und Auswerten von während des Fahrzeugbetriebs mitgeloggten Daten darauf geschlossen werden, welche Einheiten in einer SL-Anwendung weiterverwendet bzw. recycelt werden sollten. Mit der derzeitigen Datengrundlage ist dies aber nur unzureichend umsetzbar, zudem muss bezweifelt werden, dass der Fahrzeughersteller bereit dazu wäre, diese Daten weiterzugeben, sollte er die Wiederaufbereitung nicht selbst durchführen. Eine umfassende Beschreibung von in der Fachliteratur prinzipiell vorhandenen SoH-Zustandsschätzern für den Fahrzeugbetrieb findet sich in (92). Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage müssen die Batterieeinheiten auf gewünschter Ebene (i. d. R. auf Modulebene) einzeln vermessen werden, was einen erheblichen Zeit- und somit Kostenaufwand darstellt. Letzterer wird für den gesamten Ablauf der Wiederaufbereitung (von der Demontage der LITB bis zur Montage „neuer“ SL-Batterien) in der Literatur i. d. R. auf Werte zwischen 110 €/kWh und 11 €/kWh geschätzt, wobei der Kostenaufwand mit zunehmender Verbreitung von SL-Konzepten abnehmen wird (6) (12) (18) (20). Einen

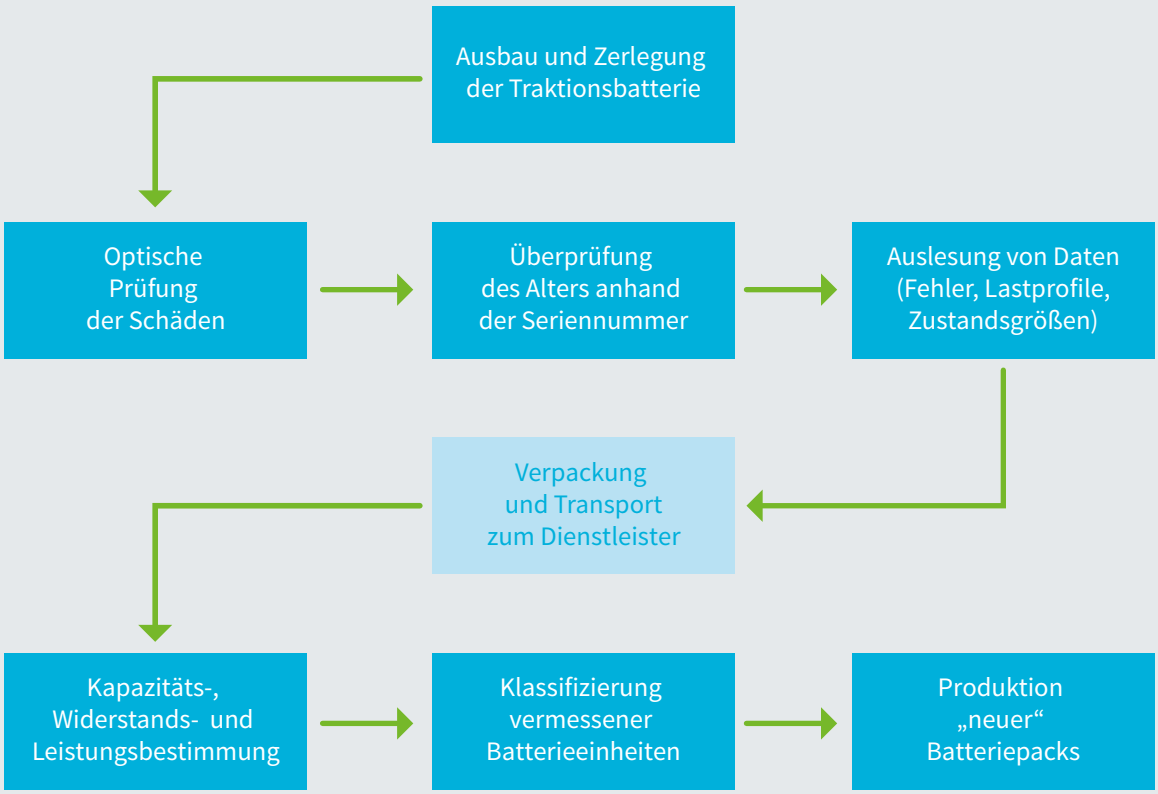
wesentlichen Anteil dieser Kosten nimmt dabei die Vermessung der einzelnen Batterieeinheiten ein. Hierbei steigt der Aufwand mit der Kapazität der Batterien deutlich an. Eine Angabe der Wiederaufbereitungskosten bezogen auf die Stückzahl wäre zudem denkbar, da mit steigender Anzahl aufzubereitender LITB der bezogene Preis abnehmen würde. Die Werte verstehen sich als allgemeine Richtwerte und beziehen sich nicht auf konkrete SL-Anwendungen. Grundsätzlich schmälern die Kosten für die Wiederaufbereitung aber den Restwert von LITB und sind daher ein wichtiger Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit. Im Folgenden soll die Notwendigkeit kostengünstiger Alterungsschnelltests anhand einer Erläuterung des Ablaufs der Wiederaufbereitung und des Aufwands derzeit üblicher bzw. vorgeschriebener Verfahren zur Vermessung von Batterien verdeutlicht werden.

### 7.5.1 Ablauf

Wie in Kapitel 4 dargestellt, besteht ein SL-Konzept grundsätzlich aus den Stadien Fahrzeugbetrieb, Wiederaufbereitung und SL-Anwendung. Die Wiederaufbereitung gliedert sich stets in den Ausbau und das ggf. notwendige Zerlegen von LITB, die Auswahl zur Weiterverwendung geeigneter Batterieeinheiten sowie die Produktion „neuer“ SL-Batterien. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte genauer aufgeschlüsselt.

Grundsätzlich gilt es bei der Herstellung und Verbreitung von Batterien verschiedene gesetzliche Vorschriften einzuhalten (siehe z. B. (2)). Um den Kostenaufwand der Wiederaufbereitung gealterter LITB zu SL-Batterien zu bewerten, ist zu klären, inwiefern die bestehenden Vorschriften durch die Wiederaufbereitung beeinflusst werden. Da es hierzu aktuell keine Regularien und Vorschriften bzw. Vorarbeiten gibt, werden im Folgenden Annahmen getroffen. Aufgrund nicht vorhandener Regularien müssten prinzipiell keine zusätzlichen Angaben bereitgestellt werden, die nicht ohnehin bereits für die Batterien im Neuzustand erhoben wurden. Es darf aber angenommen werden, dass die Kaufbereitschaft von Kunden bei Unkenntnis wesentlicher Angaben von SL-Batterien, wie z. B. Restkapazität, Alter, Leistungsfähigkeit, niedrig wäre.

Bezüglich der Vorschriften wird angenommen, dass die Transportnorm UN38.3, welche weltweit Voraussetzung für den Transport von auf Lithium basierten Zellen bzw. Batterien (primär und sekundär) per Straße, Schiene, Schiff- oder Luftfahrt ist, durch die Wiederaufbereitung nicht beeinflusst wird. Diese Annahme beruht darauf, dass die SL-Batterien bzw. Module im Widerauf bereitungsprozess weder in ihrer Beschaffenheit, noch hinsichtlich Schutzeinrichtungen oder Verschaltung verändert, sondern lediglich aus dem Modulverbund entnommen werden. Es ist jedoch




**A09:** Möglicher Ablauf der Wiederaufbereitung gealterter LITB hin zu SL-Batterien

zu beachten, dass in UN38.3.2.2 eine Neuprüfung von Sekundärbatterien bei mehr als 20 % Kapazitätsverlust vorgeschrieben wird. Es wird daher weiterhin angenommen, dass die SL-Batterie mit einer Restkapazität von 80 % gerade noch ohne erneute Prüfung transportiert werden kann. Da die Einzelprüfungen der Verordnung, wie beispielsweise Höhensimulation, Schock-, Kurzschluss- oder Überladungstest, hinsichtlich Aufwand und Durchführbarkeit schwer einzuschätzen sind, könnte dieser Passus grundsätzlich ein Hemmnis für SL-Konzepte darstellen, und sollte daher genauer überprüft und bewertet werden (siehe hierzu auch Sondervorschrift 636 des ADR). Weiterhin wurde in (93) gezeigt, dass LIZ den in UN38.3 formulierten Vibrationstest ggf. ohne Schäden überstehen, es aber dennoch über einen längeren Betriebszeitraum im BEV durch beständige Belastung zu vibrationsbedingten Zellausfällen kommen kann. Allerdings kann angenommen werden, dass die Gefahr solcher mechanischer Dauerbelastungsschäden im sekundären stationären Anwendungsfall deutlich geringer ist. Für mobile SL-Anwendungen wie z. B. Flurförderzeuge, bei denen es wie bei Personenkraftwagen fortan zu Vibrationsbelastungen kommt, ist hingegen eine erneute Überprüfung der Transportnorm UN38.3 zu überdenken. Zudem wird angenommen, dass die Richtlinie zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) mit der Richtliniennummer 2014/30/EU nicht beeinflusst wird. Die Pflicht zur Angabe der Kapazität einer Zelle bzw. Batterie, formuliert im BattG §17, in der DIN EN 61960 oder auch in der europäischen Verordnung 1103/2010, sollte hingegen nach bzw. während der Wiederaufbereitung erneuert werden. Neben den beschriebenen gesetzlichen Vorgaben gibt es zudem freiwillige Qualitäts-

standards, z. B. formuliert in DIN EN 62660-1/2, ISO 12405-1 DIS und ISO 12405-2 WD, welche Empfehlungen zur Erhebung technischer Kennwerte, wie z. B. der Leistung, Kapazität oder dem Alterungsverhalten, aussprechen.

Es stellt sich bei der Wiederaufbereitung gealterter LITB hin zu SL-Batterien grundsätzlich die Frage, welche Schritte zur Qualitätssicherung unumgänglich sind und welche mit geringerem Aufwand durchgeführt werden bzw. entfallen können (verglichen mit den Standards bei neuen Zellen bzw. Batterien). Je geringer der Kostenaufwand der Wiederaufbereitung, desto höher ist der Restwert gealterter LITB. Der in Abbildung A09 dargestellte mögliche Ablauf (nach heutigen Standards) wird im Folgenden diskutiert und die einzelnen Aufwände sowie Reduktionspotenziale der Teilprozesse bewertet. Im zweiten studienbegleitenden Workshop wurde dieser Ablauf dem Studienbeirat präsentiert und gemeinsam diskutiert. Die einzelnen Schritte müssen dabei nicht zwangsläufig von einem Akteur durchgeführt werden, sondern können, je nachdem, welcher Akteur die SL-Batterie herstellt und/oder vertreibt, an verschiedene Beteiligte aufgeteilt werden.

Der Ausbau einer LITB wird bereits standardmäßig wegen der Rücknahmeverpflichtung des Fahrzeugherstellers durchgeführt, weswegen der als gering eingestufte Aufwand bereits im Verkaufspreis von BEV einkalkuliert ist. Auch das Zerlegen der LITB in deren modulare Einheiten wird als nicht besonders aufwändig eingeschätzt. Werden ganze LITB in einem Großspeicher verschaltet, entfällt der Zerlegungsprozess. Ein Zerlegen bis auf Zellebene ist i. d. R. ökonomisch nicht sinnvoll, da z. B. der Aufwand durch notwendiges Aufbrechen von Lötstellen oder Schweißpunkten nicht vertretbar ist. Auch bei verschraubten Zellen in größeren Formaten darf bezweifelt werden, dass ein Zerlegen bis auf Zellebene rentabel ist.

Im nächsten Schritt werden die Batterieeinheiten optisch auf Schäden, wie z. B. undichten Stellen oder Brandspuren, geprüft. Einheiten, die optisch erkennbare Schäden aufweisen, dürfen gemäß UN38.3 nicht transportiert werden und kommen für eine Weiterverwendung nicht in Frage. Durch das Überprüfen des Alters anhand der Seriennummer und dem Auslesen von Daten, wie z. B. Fehlerprotokollen, Lastprofilen und Zustandsgrößen, können ggf. weitere Einheiten vom Einsatz in einer SL-Anwendung bereits vorab ausgeschlossen und direkt dem Recyclingprozess zugeführt werden. Wie bereits erwähnt wäre es aus ökonomischer Sicht ideal (derzeit aber nicht umsetzbar), wenn die Klassifizierung der Batterieeinheiten nur durch Auslesen der im Fahrzeugbetrieb mitgeloggten Zustandsgrößen (insbesondere SoH) möglich wäre. Dies würde den als kritisch eingestuften Messaufwand (Kapazität, Widerstand, Leistung, etc.) vermeiden, ist allerdings aufgrund fehlender Standardisierung von aktuell herstellerspezifischen Lösungen limitiert. Der Aufwand für die optische Prüfung, die Altersbestimmung anhand der Seriennummer sowie das Auslesen von Daten wird

hingegen als minimal eingeschätzt. In dem in Abbildung A09 dargestellten Ablauf wird angenommen, dass der Fahrzeughersteller durch die zuvor beschriebenen Prozesse eine Vorauswahl trifft, welche Batterieeinheiten von einer potenziellen Weiterverwendung ausgeschlossen und direkt dem Recyclingprozess zugefügt werden sollten.

Im nächsten (optionalen) Schritt werden die vorselektierten Batterieeinheiten vom Fahrzeughersteller verpackt und durch ein Logistikunternehmen zu einem Dienstleister transportiert. Der Dienstleister entscheidet durch eine intensive Vermessung endgültig, welche Einheiten weiterverwendet werden sollen. Gebrauchte (aber funktionsfähige) Batterien müssen gemäß der Verpackungsanweisung P903, nachzulesen im ADR 2015, grundsätzlich die gleichen Transportbedingungen erfüllen wie neue Batterien (94). Lediglich für Batterien mit bereits optisch erkennbaren Schäden gibt es spezielle Richtlinien, solche wurden aber bereits in einem vorhergehenden Schritt identifiziert und von einer potenziellen Weiterverwendung ausgeschlossen. Beim Transport müssen folgende Vorkehrungen bzgl. der Verpackung gemäß der Verpackungsanweisung P903 getroffen werden:

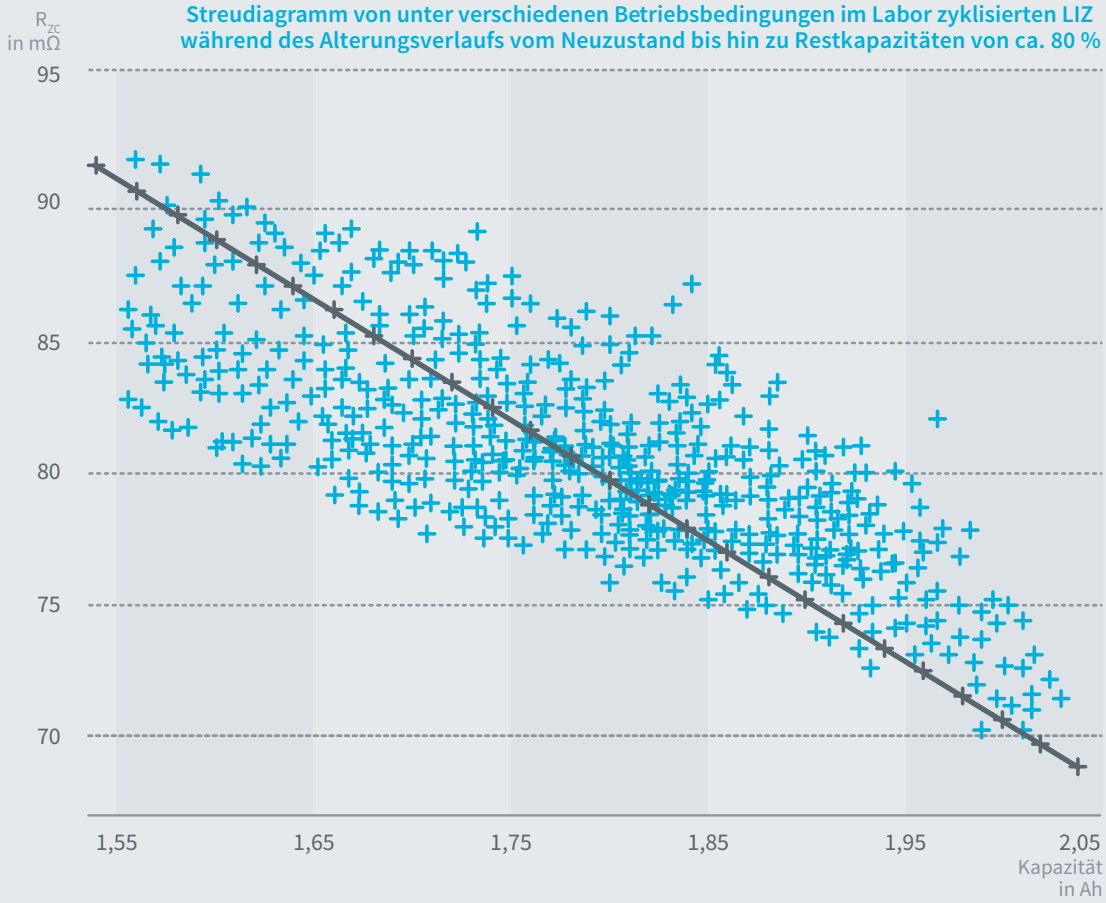
- widerstandsfähige Außenverpackungen,
- Schutzumschließungen (z. B. vollständig geschlossene Verschläge oder Lattenverschläge aus Holz),
- Paletten oder andere Handhabungseinrichtungen.

Insbesondere müssen die Batterieeinheiten „gegen unbeabsichtigte Bewegung gesichert sein und die Pole dürfen nicht mit dem Gewicht anderer darüber liegender Elemente belastet werden“ (94). Der Kostenaufwand eines solchen Transports wird grundsätzlich als mittel bis hoch eingeschätzt. Es sei darauf hingewiesen, dass die „neuen“ SL-Batterien, nach deren Produktion beim Dienstleister zum Ort der SL-Anwendung transportiert werden müssen. Dies stellt aber keinen Unterschied verglichen mit neuen Batterien dar. Entsprechend verringert dies auch den Restwert von LITB nicht. Da hier aber angenommen wird, dass ein Dienstleister und nicht der Fahrzeughersteller selbst die Vermessung, Klassifizierung und Montage der SL-Batterien durchführt, entsteht ein zusätzlicher Verpackungs- und Transportvorgang, sofern der Dienstleister nicht hausintern beim Fahrzeughersteller operiert. Dieser zusätzliche Aufwand schmälert daher den Restwert gebrauchter LITB und sollte vermieden werden. Es wird deshalb die Empfehlung ausgesprochen, dass ein Fahrzeughersteller stets selbst die Vermessung und Klassifizierung der Batterieeinheiten sowie Montage der SL-Batterien durchführen oder einen hausinternen Dienstleister damit beauftragen sollte.

Als aufwandskritischster Schritt hingegen wird die (noch) notwendige Vermessung und Klassifizierung der Batterieeinheiten eingeschätzt. Durch Klassifizierung werden Gruppen von Einheiten mit möglichst ähnlichen Eigenschaften gebildet, die dann zu „neuen“ SL-Batterien zusammengefügt werden. Üblicherweise werden für Batterien zur Klassifizierung Kapazitäts-, Widerstands- und/oder Leistungswerte gemessen. Empfehlungen zur Erhebung technischer Kennwerte werden z. B. in DIN EN 62660-1/2, ISO 12405-1 DIS und ISO 12405-2 WD ausgesprochen. So wird z. B. in der DIN EN 62660-1 empfohlen, die Kapazität mit einer Stromrate von 1/3 C zu bestimmen, was in einem Zeitaufwand von näherungsweise 6 Stunden pro Zyklus und Batterieeinheit resultieren würde. Hinzu kommen teilweise erhebliche Wartezeiten (mindestens 12 h, je nach Masse des Prüflings auch mehr) für die Vorkonditionierung der Batterien, da für vergleichbare Messungen definierte Temperaturen im Prüfling vorherrschen müssen. Widerstandsmessungen über kurze Strompulse (oder mit der elektrochemischen Impedanzspektroskopie bei hohen Frequenzen) weisen hingegen eine erheblich reduzierte Dauer auf. Der hohe zeitliche Aufwand bei Kapazitätsmessungen wird zudem grundsätzlich um den ebenfalls hohen Kostenaufwand der dafür notwendigen Messgeräte ergänzt. Neben dem Vermeiden unnötiger Verpackungs- und Transportvorgänge ist daher die Vermessung und Klassifizierung ein weiterer Teilprozess mit hohem Aufwandsreduktionspotenzial.

### 7.5.2 Beispiel für einen Alterungsschnelltest

Da Widerstandsmessungen verglichen mit Kapazitätsmessungen zeitlich erheblich weniger aufwendig sind, basiert der hier beispielhaft vorgestellte Ansatz eines Alterungsschnelltests auf einer angenommenen Korrelation zwischen ohmschem Widerstand und Kapazität. Dahinter steckt die Idee, aus einem bereits vorab verfügbaren Datensatz eines Alterungsexperiments einen funktionellen Zusammenhang zwischen Widerstands- und zugehörigen Kapazitätswerten zu erstellen (z. B. durch lineare Regression). Ist ein solcher Zusammenhang vorhanden, lässt sich die Kapazität einer Batterieeinheit durch Einsetzen des (unter geringem zeitlichem Aufwand gemessenen) Widerstandswerts in die ermittelte Funktion berechnen. Ein solcher Ansatz wurde z. B. in (95) und (96) untersucht. Abbildung A10 zeigt ein Streudiagramm von Kapazitäts- und zugehörigen ohmschen Widerstandswerten von unter verschiedenen Betriebsbedingungen im Labor zyklisierten LIZ (Graphit-Anode, NMC-Kathode) während des Alterungsverlaufs vom Neuzustand bis hin zu Restkapazitäten von ca. 80 %. Für die dargestellten Wertepaare wurde ein funktioneller Zusammenhang mit der durch die „Least Squares“-Methode optimierte lineare Regressionsanalyse berechnet. Statt dem in DIN EN 62660 1 empfohlenen, aber äußerst zeitaufwendigen Verfahren zur Kapazitätsmessung kann durch

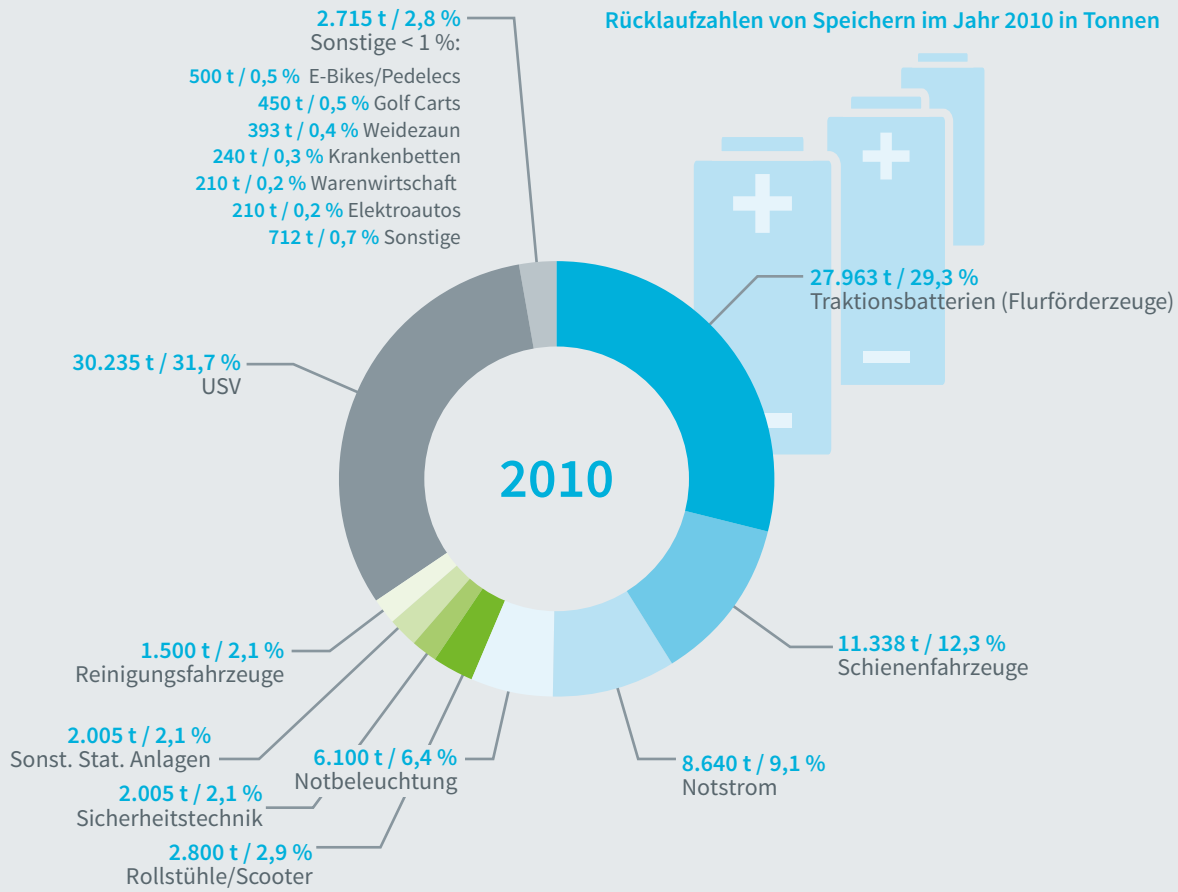



die ermittelte Funktion ($C = 3{,}57\ Ah - 2{,}22 \cdot 10^{-2}\ A^2hV^{-1} \cdot R_{zc}$) die Kapazität C aus einer zeiteffektiven Widerstandsmessung (wenige Sekunden) grob abgeschätzt werden. Voraussetzung hierfür ist neben einem funktionellen Zusammenhang zwischen Kapazitätsverlust und Widerstandsanstieg eine Unabhängigkeit des $R_{zc}$ vom SoC der Batterieeinheit, welche für die meisten LIZ-Modelle gegeben ist.

Der auf der Korrelation zwischen Kapazität und Widerstand beruhende Ansatz eines Alterungsschnelltests ist lediglich als ein mögliches Beispiel zu sehen. Bei einer maximalen relativen Abweichung von ca. ±10 % bzgl. eines Wertepaars und der ermittelten Funktion in Abbildung A10 weist dieser Ansatz Schwächen in der Genauigkeit auf und dient daher lediglich als Abschätzung. Eine mögliche Alternative wäre es, die Ruhespannung einer LIZ vor und nach einem Strompuls mit bekannter Dauer und Stromstärke zu messen, und die durch die bekannte Ladungsmenge resultierende Änderung der Ruhespannungskennlinie mit der einer neuen Zelle zu vergleichen. Durch um die Alterung angepasste Extrapolation der Ruhespannung könnte auf den aktuellen Kapazitätswert geschlossen werden. Nach der Beschreibung des Wiederaufbereitungsprozesses von gealterten LITB hin zu SL-Batterien werden im folgenden Kapitel potentiell geeignete SL-Anwendungen vorgestellt und bewertet.

**A10:** Streudiagramm von unter verschiedenen Betriebsbedingungen im Labor zyklisierten LIZ während des Alterungsverlaufs vom Neuzustand bis hin zu Restkapazitäten von ca. 80 % (97)

# 8 Identifikation von Second-Life-Anwendungen




**A11:** Rücklaufzahlen in Tonnen im Jahr 2010 (98)

Nach den Grundlagen der Alterung von LIZ sowie der Wiederaufbereitung ausgedienter LITB, werden in diesem Kapitel die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von SL-Batterien diskutiert und besonders geeignete Anwendungen identifiziert. In Abbildung A11 werden die Marktanteile und Einsatzmöglichkeiten anhand der Rücklaufzahlen von Speichern im Jahr 2010 in Tonnen gemäß (98) veranschaulicht. In der Darstellung sind alle Batterietechnologien vertreten, und somit zu einem großen Teil auch Pb-Batterien, so dass zwar nicht direkt auf Marktanteile geschlossen werden kann, jedoch eine ungefähre Einordnung möglich ist. Demnach sind ein Großteil der Speicheranwendungen den Bereichen USV (unterbrechungsfreie Stromversorgung) und Flurförderzeuge zuzuordnen. Die Abbildung ist noch vor der Markteinführung von EV entstanden, so dass diese hier eine untergeordnete Rolle spielen.

Mit dem Ziel eine Vielzahl an aus heutiger Sicht interessanten SL-Anwendungen für ausgediente LITB aufzuzeigen, werden im Folgenden mithilfe eines systematischen Ansatzes (vgl. (36) und (99)) mögliche SL-Anwendungen identifiziert und beschrieben. Es wird hierfür zunächst eine Stakeholderanalyse durchgeführt, auf Basis derer die Identifikation möglicher SL-Anwendungen stattfindet. Anschließend werden zwei Anwendungen als Fallbeispiele ausgewählt, die im Rahmen der Studie intensiv untersucht werden. Für diese Fallbeispiele erfolgt neben einer Beschreibung der Anwendung auch eine Erläuterung der Datengrundlage, z. B. hinsichtlich Speicherauslegung und Lastprofil.

| Akteur | Beschreibung |
|---|---|
| Stromerzeuger | Betrieb von Kraftwerken zur Stromerzeugung unter Beachtung des wirtschaftlichen Optimums |
| Netzbetreiber | Kostenminimale Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie unter Gewährleistung der Versorgungssicherheit/-qualität und weiterer Randbedingungen |
| Stromhandel | Beschaffung von Strom am Großhandelsmarkt zur Optimierung des Portfolios und Minimierung des Risikos |
| Verbraucher | Letztverbraucher von Energie, die entweder vom Versorger bezogen wird oder optional gänzlich oder teilweise selbst erzeugt wird |
| Fahrzeugnutzer | Nutzer von batterie-elektrischen Fahrzeugen zur Erfüllung der Mobilitätsnachfrage |
| Hersteller | Produzenten von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen und/oder Batterien |
| Verwertungsunternehmen | Unternehmen, das Altbatterien entsorgt, recycelt oder aufbereitet |
| Dienstleister | Unternehmen, das Dienstleistungen anbietet (z. B. Ladesäulenbetreiber, Betreiber eines Speicherpools, öffentlicher Verkehr etc.) |

**A12:** Übersicht der Stakeholder von SL-Batterien

## 8.1 Stakeholderanalyse und Übersicht

Im Rahmen der Stakeholderanalyse wird zunächst eine Übersicht über mögliche Stakeholder von SL-Batterien gegeben. Diese werden anschließend hinsichtlich ihrer Handlungsfelder untersucht, um SL-Anwendungen abzuleiten.

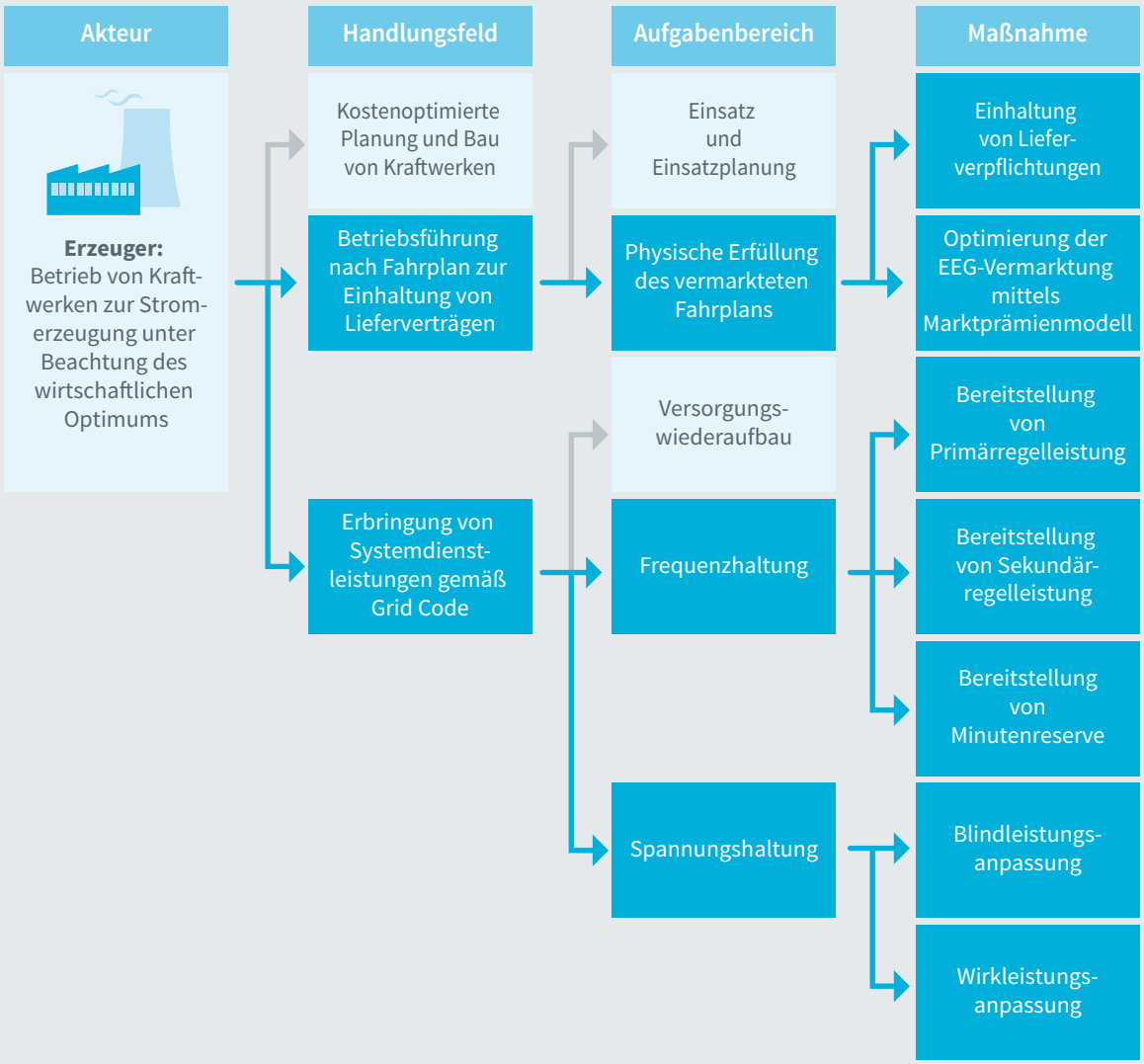
Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Eigenschaften von SL-Batterien nach Erstnutzung lassen darauf schließen, dass diese vorwiegend für stationäre Energiespeicheranwendungen, aber auch für mobile Anwendungen mit geringeren Anforderungen als in der Erstnutzung in Frage kommen. Im Rahmen des Projekts Hausspeicher 2.0 (100) konnten Stakeholder für stationäre Speichersysteme identifiziert werden, welche auch auf SL-Batterien übertragbar sind. Dazu zählt neben dem Stromerzeuger, dem Netzbetreiber und dem Stromhandel auch der Letztverbraucher. Für SL-Batterien sind jedoch nicht nur die Akteure der Energiewirtschaft von Interesse, sondern auch die Akteure aus dem Verkehrssektor. Zu diesen Akteuren sind die Fahrzeug- und Batteriehersteller, die Verwertungsunternehmen von Batterien, der Fahrzeugnutzer sowie verschiedene Formen von Dienstleistern zu zählen.

Eine zusammenfassende Übersicht der Stakeholder von SL-Batterien ist in Abbildung A12 dargestellt. Diese wurde im Rahmen des ersten Workshops vom 20. April 2015 mit dem Studienbeirat abgestimmt und dient als Basis für die Auswahl relevanter SL-Anwendungen.

Basierend auf den Motivationen, die sich aus den Handlungsfeldern der verschiedenen Stakeholder ergeben, werden SL-Anwendungen abgeleitet. Die Vorgehensweise zur Identifikation von SL-Anwendungen wird im Folgenden anhand eines Beispiels kurz erläutert. Der Stromerzeuger ist neben der kostenoptimierten Planung und dem Bau von Kraftwerken zudem für die Betriebsführung und die Erbringung von Systemdienstleistungen zuständig (siehe Abbildung A13). Im Rahmen dieser Handlungsfelder kommen unter anderem Aufgaben, wie die physische Erfüllung des Fahrplans und die Spannungshaltung, auf ihn zu. Batteriespeicher können für die Maßnahmen, die zur Erfüllung der Aufgaben notwendig sind, unterstützend zum Einsatz kommen. Mögliche SL-Anwendungen sind somit beispielsweise die Bereitstellung von Regelleistung und die Zwischenspeicherung elektrischer Energie zur Optimierung der EEG Vermarktung.

Nach dieser Systematik wird für alle in Abbildung A12 dargestellten Stakeholder vorgegangen. Eine Zusammenfassung und vereinfachte Darstellung der identifizierten Anwendungsfälle für SL-Batterien ist Abbildung A14 zu entnehmen.

Es lässt sich erkennen, dass ausgehend von den Aufgaben und Interessen der Akteure in den unterschiedlichen Sektoren sich eine Vielzahl an möglichen Anwendungsfällen, insbesondere in der Energiewirtschaft, ableiten lassen. Auf Basis der Akteure aus dem Verkehrs- und Logistiksektor konnten mobile sowie stationäre Anwendungen identifiziert werden. Sowohl im Energie- als auch im Verkehrssektor wird die Rolle des Dienstleisters in Zukunft zunehmend für eine Vielzahl an Anwendungsfällen an




**A13:** Erläuterung der Systematik zur Identifikation potenzieller Anwendungsfälle am Beispiel des Stromerzeugers nach (100)
(Dunkelblau = relevant für SL-Speicher)

Bedeutung gewinnen. Im Energiesektor ist dies vor allem auf die steigende Marktteilnahme kleinerer Akteure, wie zum Beispiel Haushalte, und im Mobilitätssektor auf die Marktdurchdringung elektrischer Fahrzeuge und die damit einhergehende Infrastruktur zurückzuführen.

Es ist zudem anzumerken, dass für das Verwertungsunternehmen keine konkreten SL-Anwendungen identifiziert werden konnten, da deren Maßnahmen, wie z. B. die Sammlung und ggf. Aufbereitung gebrauchter Batterien, nicht anwendungsspezifisch sind. Da somit alle aufgelisteten Anwendungsfälle für ein Verwertungsunternehmen grundsätzlich von Interesse sein können, wird dieser Akteur nicht getrennt dargestellt, obwohl er eine wichtige Rolle in SL-Konzepten einnehmen kann. Auch der Fahrzeugnutzer und der Hersteller können grundsätzlich ein Interesse an allen Anwendungsfällen haben, solange diese einen wirtschaftlichen Vorteil mit sich bringen. In Abbildung A14 werden daher für jeden Anwendungsfall nur die direkt mit dem Anwendungsfall in Zusammenhang stehenden Akteure dargestellt.

| | | Strom-erzeuger | Netz-betreiber | Strom-handel | Ver-braucher | Fahrzeug-nutzer | Hersteller | Dienst-leister |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Einhaltung von Lieferverpflichtungen | ✓ | | | | | | |
| 2 | Bereitstellung von Blindleistung | ✓ | ✓ | | ✓ | | | |
| 3 | Bereitstellung von Regelleistung | ✓ | ✓ | | ✓ | | | |
| 4 | Lasterhöhung bei hoher EE-Einspeisung | | ✓ | | | | | |
| 5 | Einsatz für den Redispatch | | ✓ | | | | | |
| 6 | Handel am Day-Ahead-/ Intraday-Markt | | | ✓ | | | | |
| 7 | Erhöhung des Eigenverbrauchs | | | | ✓ | | | (✓) |
| 8 | Spitzenlast-management | | | | ✓ | | | |
| 9 | Gezielte EE-Vermarktung | ✓ | | | ✓ | | | |
| 10 | Notstrom-versorgung | | | | ✓ | | | |
| 11 | Schwarzstart | ✓ | ✓ | | | | | |
| 12 | Optimierung des Betriebspunktes (Lastfolgebetrieb) | ✓ | | | | | | |
| 13 | Bestandteil eines Micro-Grids | | | | ✓ | | | |
| 14 | Autarke Energie-versorgung (Off-Grid) | | | | ✓ | ✓ | | |
| 15 | Kurzstrecken-fahrzeuge | | | | | ✓ | ✓ | |
| 16 | Flurförderzeuge | | | | | ✓ | ✓ | |
| 17 | Leistungspuffer an Schnellladesäulen | | | | | ✓ | | ✓ |
| 18 | Energierück-gewinnung bei Schienenfahrzeugen | | | | | ✓ | | ✓ |
| 19 | Sonstige (z. B. Weide-zaun, Krankenbetten etc.) | | | | ✓ | | | (✓) |

**A14:** Übersicht der identifizierten Anwendungsfälle für SL-Batterien unterteilt nach Stakeholdern

## 8.2 Auswahl von Second-Life-Anwendungen

Das breite Spektrum an SL-Anwendungen wird in bisherigen Arbeiten meist in stationäre und mobile Anwendungen unterteilt. Da der Alterungsverlauf von einer Vielzahl von Parametern, wie z. B. der C-Rate, der jährlich akkumulierten Zyklenanzahl und dem DoD sowie mittleren SoC, abhängt (vgl. Kapitel 7), ist eine eindeutige Klassifizierung der verschiedenen Anwendungen nach Anforderungsprofil nur schwer möglich. Für die Auswahl der SL-Anwendungen zur näheren Betrachtungen wurde daher wie folgt vorgegangen:

Im Rahmen des ersten Workshops wurde zunächst eine Übersicht über mögliche Anwendungsfälle gegeben. Eine Auswahl an Anwendungen, die aus Markt- und Nutzersicht aktuell von besonderem Interesse sind, wurde anhand von kurzen Steckbriefen vorgestellt und anschließend im Rahmen einer Diskussionsrunde mit den Teilnehmern des Studienbeirats überarbeitet und ergänzt. Im Zuge der abschließenden Priorisierung der diskutierten Anwendungen fiel die Auswahl für die beiden Fallbeispiele auf den Einsatz von SL-Batterien als HSS und die Bereitstellung von PRL. Diese beiden Anwendungen sind nicht nur aus wirtschaftlicher Sicht interessant, da sie unterschiedliche Akteure und Märkte betreffen, sondern werden zudem durch zwei sehr unterschiedliche Lastprofile charakterisiert. Denn während die PRL-Bereitstellung sich durch kontinuierliche und schnell wechselnde, alternierende Lastzyklen bei höheren C-Raten auszeichnet, wird die Batterie in einem Hausspeichersystem in annähernd täglichen Abständen mit tiefen Zyklen, aber geringen C-Raten betrieben. Die beiden ausgewählten Fallbeispiele werden in Kapitel 8.3 im Detail beschrieben. Weitere Anwendungen, die im Rahmen des Workshops oder aufgrund ihres Anteils am Batteriemarkt (vgl. Abbildung A11) als interessant eingestuft wurden, werden ebenfalls kurz dargestellt. Dazu zählen die Notstromversorgung, der Einsatz in Flurförderzeugen, das industrielle Spitzenlastmanagement sowie die Anwendung als Leistungspuffer für Schnellladesäulen.

## 8.3 Beschreibung der Second-Life-Anwendungen

Im Folgenden werden die in Kapitel 8.2 ausgewählten Anwendungen näher beschrieben. Dabei wird insbesondere auf die Marktsituation sowie die anwendungsspezifischen Anforderungen an SL-Batterien eingegangen. Als Grundlage für die darauffolgende Restwertmodellierung

und Wirtschaftlichkeitsbewertung werden die beiden Fallbeispiele PRL und HSS in Kapitel 8.3.1 im Detail beschrieben. Dabei wird insbesondere auf die in der Modellierung verwendeten Lastprofile eingegangen und abschließend ein zusammenfassender Steckbrief zur Verfügung gestellt. Weiterhin wird in Kapitel 8.3.2 auf die weiteren als interessant eingestuften Anwendungen eingegangen.

## 8.3.1 Fallbeispiele

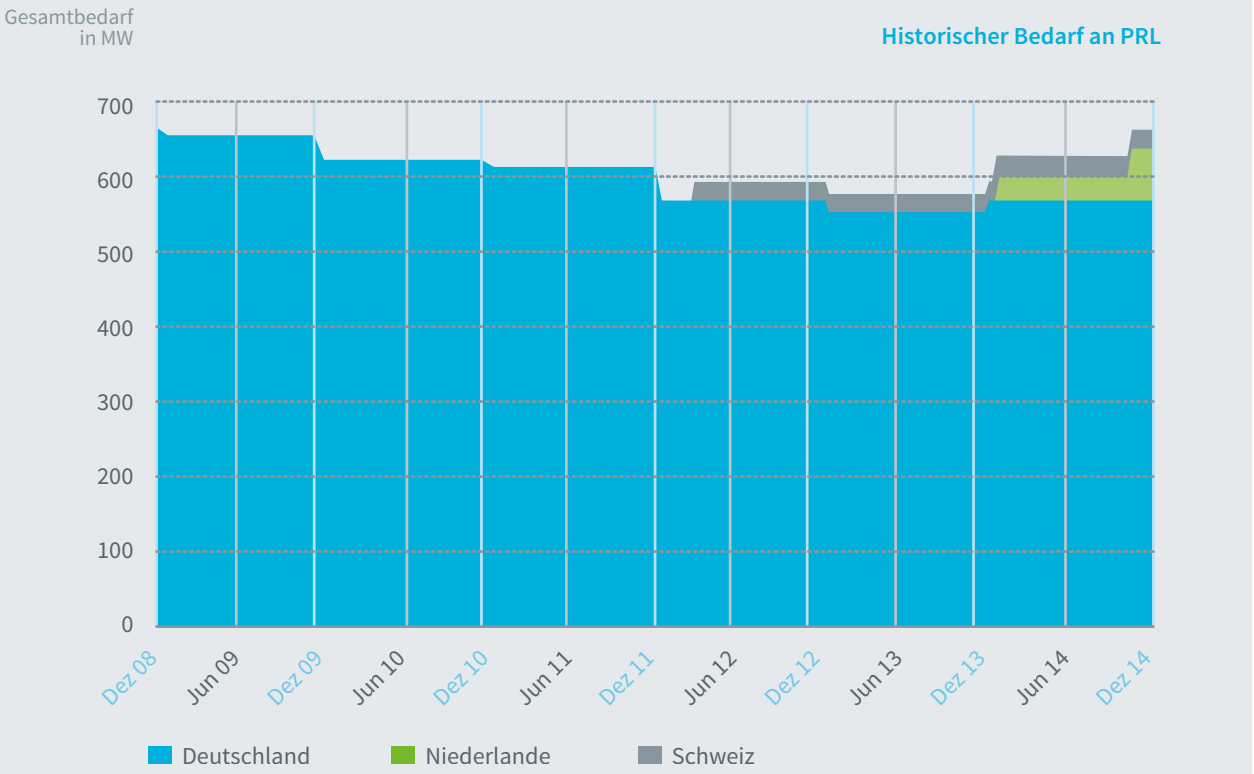
### 8.3.1.1 Primärregelleistung

#### Kurzbeschreibung

Die Gleichgewichtsfrequenz im europäischen Verbundnetz beträgt 50 Hertz. Sie liegt vor, wenn Stromeinspeisung und -bezug im Gleichgewicht stehen. Kann dieses Gleichgewicht nicht gehalten werden, kommt es zu einer Abweichung von der Gleichgewichtsfrequenz. Es ist Aufgabe der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) die Gleichgewichtsfrequenz durch den Einsatz von Regelleistung wieder herzustellen. Zu diesem Zweck stehen ihnen drei verschiedene Regelleistungsarten zur Verfügung. Die PRL muss innerhalb von 30 Sekunden vollständig aktiviert sein. Um die Leistung der PRL wieder verfügbar zu machen, werden bei länger währenden Störungen die Sekundärregelleistung und anschließend die Minutenreserve zur Kompensation der fehlenden oder überschüssigen Leistung im Netz eingesetzt (101) (102).

Seit 2007 wird der Bedarf an PRL über eine gemeinsame Ausschreibung der vier ÜNB auf der Internetplattform www.regelleistung.net gedeckt (101). Dieser Wettbewerb soll eine kostenoptimierte Beschaffung der Regelleistung garantieren. Die Ausschreibung erfolgt symmetrisch, das heißt gleichzeitig in positiver und negativer Richtung, über eine Woche. Die Mindestangebotsgröße ist seit 2011 auf ± 1 MW festgelegt. Die Präqualifikation der Anlagen erfolgt durch den Anschluss ÜNB. Die Voraussetzungen für die Bereitstellung von PRL sind im Transmission Code 2007 (102) sowie im Beschluss BK6-10 097 der Bundesnetzagentur (103) festgelegt. Während des Bearbeitungszeitraums dieser Studie wurde Ende August 2015 ein Leitfaden für den Einsatz von Batteriespeichern zur Bereitstellung von Primärregelleistung durch die deutschen ÜNB herausgegeben (104). Der neue Leitfaden befindet sich noch in der Abstimmung und kann zu jeder Zeit erneut angepasst werden, welches auch eine erneute Präqualifizierung bestehender Anlagen nach sich ziehen kann.

Eine SL-Batterie kann durch den Lade- und Entladevorgang zur Frequenzhaltung eingesetzt werden und somit einen Beitrag zur Netzstabilität



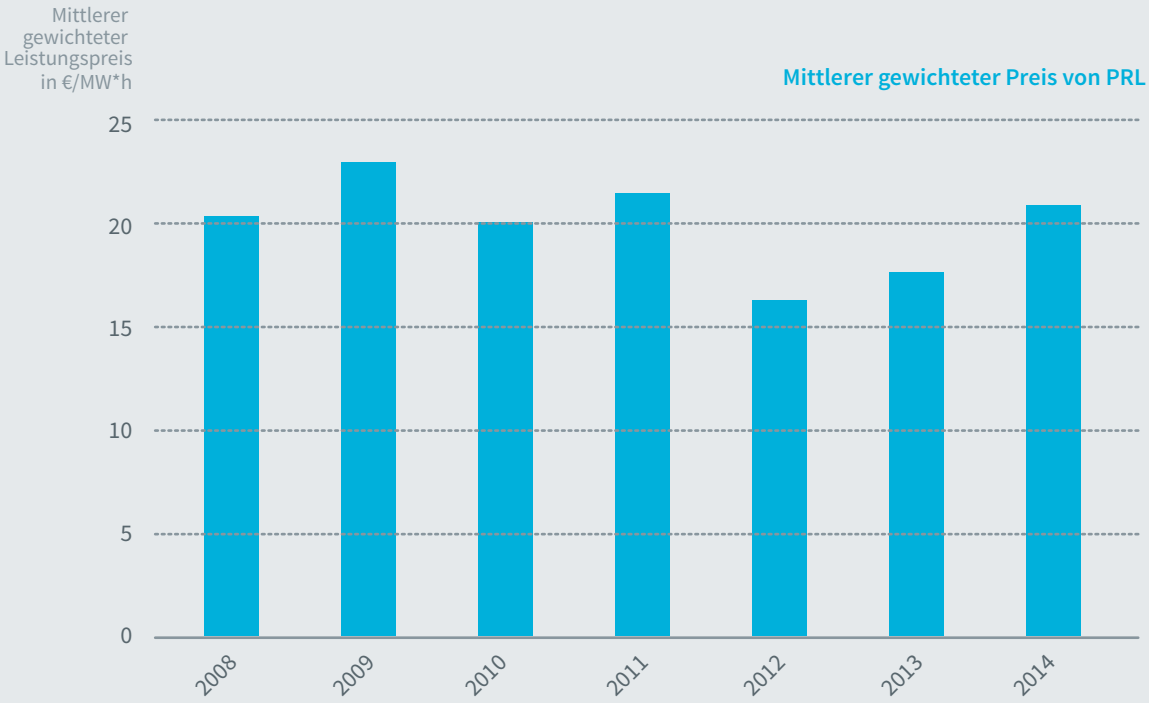

**A15:** Historischer Bedarf an PRL (eigene Darstellung nach (105))

leisten. Im Falle eines Einsatzes für die PRL erfolgt die Aktivierung des Speichers vollautomatisch bei Frequenzabweichungen im Netz. Aufgrund der kurzen Aktivierungszeit sind Batteriespeicher, die zudem hohe Leistungsgradienten erzielen können, für die PRL-Bereitstellung besonders attraktiv. Im Rahmen des ersten Workshops wurde jedoch angemerkt, dass die geringen Ruhezeiten gegebenenfalls negative Auswirkungen auf das (Zell-)Balancing haben könnten.

### Markt

Die Bereitstellung von PRL erfolgt derzeit vorwiegend durch fossile Kraftwerke. Zunehmend drängen jedoch auch kleinere technische Einheiten, wie z. B. Batteriespeicher, in den Markt. Der Bedarf und das Angebot an Regelleistung und die damit verbundenen Kosten hängen von einer Vielzahl verschiedener, oft konkurrierender Einflussfaktoren ab. Mögliche Einflussfaktoren auf das Angebot sind z. B. die Anbieterzahl, die Angebotsmenge sowie die Kosten der Technologien. Auf der Bedarfsseite stehen Prognosefehler der Last und der Einspeisung aus erneuerbaren Energien, Kraftwerksausfälle, die Größe des Netzregelverbunds sowie die Struktur des Strommarkts. Eine konkrete Zuordnung dieser Effekte sowie eine Prognose der zukünftigen Marktentwicklung sind nur schwer möglich. Alle Auswertungen zur PRL basieren daher auf historischen Daten. (36)

Die PRL wird für das gesamte Netzgebiet des Verbands Europäischer Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E) bemessen. Daraus wird der Gesamtbedarf für Deutschland, der in Abbildung A15 dargestellt ist, abge-




**A16:** Mittlerer gewichteter Preis von PRL (eigene Darstellung nach (105))

leitet. Es ist zu erkennen, dass der Bedarf an PRL zunächst eine fallende Tendenz aufweist. Seit März 2012 jedoch bezieht die Schweiz 25 MW und seit Januar 2014 die Niederlande etwa 67 MW des Bedarfs an PRL über die deutsche Ausschreibungsplattform.

Die Vergütung der PRL erfolgt ausschließlich über den Leistungspreis, für den der Anbieter über die Ausschreibungsdauer von einer Woche den Zuschlag bekommen hat. Abbildung A16 zeigt die historische Entwicklung der spezifischen Leistungspreise. Diese schwanken im Laufe der Jahre und zeigen seit 2012 eine leicht steigende Tendenz, welche aufgrund oben genannter Gründe jedoch nicht für die Zukunft fortgeschrieben werden kann. In 2014, dem Jahr der Kopplung des deutschen mit dem niederländischen Markt, lag der mittlere Leistungspreis bei ungefähr 21 €/MW·h bzw. knapp 3500 €/MW·Woche.

### Anforderungen

Aus den in der Kurzbeschreibung erwähnten Regularien ergeben sich verschiedene Anforderungen, die Speicher für die PRL-Bereitstellung erfüllen müssen:

→ **Regulatorisch und organisatorisch:**
Bedingt durch das Ausschreibungsprodukt muss die bereitgestellte Leistung über eine Woche sowohl in positiver als auch in negativer Richtung verfügbar sein. Da eine Mindestangebotsgröße von ± 1 MW erforderlich ist, kann unter gewissen Auflagen ein physikalischer sowie organisa-

torischer Zusammenschluss mehrerer Speicher in einem Anlagenpool eingesetzt werden. Der Poolbetreiber bringt die benötigte Expertise im energiewirtschaftlichen Handel mit. Zudem kann durch das Anbieten in einem Pool mit mehreren Anlagen die einwöchige Verfügbarkeit garantiert und die Betriebskosten minimiert werden. Denn es besteht die Problematik, dass im Falle eines Anschlusses an das öffentliche Netz die Betriebskosten sehr hoch ausfallen können, da der Speicher derzeit rechtlich als Letztverbraucher definiert ist und somit für den Netzbezug der größte Teil der Steuern und Umlagen anfallen. Zudem ist die Einspeisung in das Netz bei Bereitstellung positiver PRL nicht prognostizierbar, so dass dieser im schlechtesten Fall durch den Abnehmer nicht vergütet wird (106) (107). Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht darin, die Dimensionierung der Batterie kostenseitig zu optimieren. Seit August 2015 können nach (104) Speicher, welche in einem ausreichend großen Pool mit technischen Einheiten, die eine unbeschränkte Arbeitsverfügbarkeit aufweisen, ein Verhältnis von mindestens 1 MWh zu 1 MW aufweisen. Im Gegensatz dazu müssen Speicher, die nur aus elektrochemischen Speichern bestehen, nun höhere Kapazitäten aufweisen. Hintergrund ist die Einführung des auf internationaler Ebene noch in der Diskussion befindlichen 30-Minuten-Kriteriums. Dieses schreibt vor, dass stets eine Energiereserve vorhanden sein muss, um die vorgehaltene PRL für mindestens 30 weitere Minuten in positiver als auch negativer Richtung erbringen zu können. Daraus ergibt sich ein Arbeits- bzw. SoC-Bereich, in dem der Speicher betrieben werden darf. Bei einer Dimensionierung von 2 MWh zu 1 MW darf der Speicher beispielsweise nur zwischen 25 % und 75 % SoC betrieben werden. Da die Speicherkapazität von LITB maßgeblich die Kosten bestimmt, die Vergütung von PRL aber nur für die Leistung erfolgt, ist eine Dimensionierung hin zu kleineren Kapazitäten aus wirtschaftlicher Sicht generell sinnvoll.

**→ Technisch:**
Aufgrund der zuvor beschriebenen Anforderungen ist im Falle von SL-Batterien ggf. ein Zusammenschluss mehrerer technischer Einheiten in einem Pool sinnvoll. Somit besteht ein Bedarf an der Einrichtung einer Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Speicher und dem Poolbetreiber bzw. dem Anschluss ÜNB. Da die Aktivierung des Speichers vollautomatisch in Abhängigkeit der Frequenz erfolgt, sind zudem eine Frequenzmessung in nahezu sekündlicher Auflösung und eine frequenzabhängige Leistungsregelung vonnöten. Die verkabelten SL-Batterien im Gehäuse müssen somit um eine Kommunikationsbox, eine Frequenzmessung, die notwendige Leistungselektronik und einen Steuerungscomputer ergänzt werden (106).

Dem Transmission Code ist zu entnehmen, dass die Leistung bei einer Frequenzabweichung ± 200 mHz gleichmäßig in 30 Sekunden aktiviert sein muss. Im Rahmen der Präqualifikation ist gemäß Musterprotokoll

aus (101) zudem der Nachweis zu erbringen, dass ein sich in einem Pool befindlicher Speicher 15 Minuten am Stück sowohl positive als auch negative Leistung bereitstellen kann. Seit August 2015 wurden, wie zuvor beschrieben, die Anforderungen an die Speicherkapazität insbesondere von Stand-Alone-Speichern neu definiert (104).

Innerhalb dieser Anforderungen können von den Anbietern Freiheitsgrade genutzt werden, um ihre Betriebsstrategie zur Wiederherstellung des optimalen SoC = 50 % zu optimieren. In (108) werden die möglichen Freiheitsgrade am Beispiel von Batteriespeichern veranschaulicht. Zum einen besteht die Möglichkeit einer Übererfüllung, das heißt die Lade- bzw. Entladeleistung darf um bis zu 20 % über der geforderten Leistung liegen. Weiterhin kann das Totband von ±10 mHz um die Netzfrequenz von 50 Hz für das Lademanagement genutzt werden, da in diesem Band im Normalfall keine Aktivierung erfolgt. Die Leistungsbereitstellung im Totband darf jedoch nur in die jeweilige netzstützende Richtung erfolgen. Ein weiterer für Batteriespeicher relevanter Freiheitsgrad ist die Verkürzung der Aktivierungszeit von 30 Sekunden durch Erhöhung des Leistungsgradienten. Weitere Möglichkeiten für die Wiederherstellung des optimalen SoC sind Lade- und Entladevorgänge durch die Teilnahme am Stromhandel und durch andere technische Einheiten. Das jeweilige Betriebskonzept muss dem ÜNB im Rahmen der Präqualifikation vorgelegt werden.

Die Auslegung des Speichers, welche das Verhältnis von Leistung zu Kapazität (≈ C-Rate) festlegt, ist abhängig von den Batteriekosten sowie den anderen im Pool befindlichen Anlagen. Da die Bereitstellung der angebotenen Leistung über mindestens 30 Minuten in beide Richtungen nachgewiesen werden muss, ist eine C-Rate größer 1, bezogen auf die angebotene Leistung, Mindestvoraussetzung für Stand-Alone-Speicher. Während in (109) die optimale C-Rate = 1,5 beziffert wird, weist der Younicos/WEMAG-Speicher (110), der als Stand-Alone-Speicher PRL ohne Pool anbietet, eine C-Rate = 1 auf. Nach neuer Regelung kann dieser Speicher nur noch mit halber Leistung am PRL-Markt teilnehmen. Aufgrund hoher Batteriepreise werden aktuell möglichst hohe C-Raten angestrebt. Je günstiger die Batterien werden (evtl. auch bedingt durch SL-Batterien) kann es zukünftig jedoch sinnvoller sein, auf größere Kapazitäten überzugehen, um gleichzeitig auch andere Anwendungen abdecken zu können bzw. ein beschleunigtes Alterungsverhalten aufgrund hoher Leistungen zu vermeiden (106).

### Steckbrief

Zusammenfassend ergibt sich für die Bereitstellung von PRL durch SL-Batterien der in Abbildung A17 dargestellte Steckbrief.

## Beschreibung

- Einsatz von Speichern zur Haltung der Gleichgewichtsfrequenz
- Die Primärregelleistung (PRL) muss innerhalb von 30 Sekunden vollständig aktiviert und für mind. 15 Minuten verfügbar sein, bis die Sekundärregelleistung einsetzt
- Aktivierung des Speichers erfolgt vollautomatisch bei Frequenzabweichungen im Netz
- (Zell-)Balancing möglicherweise problematisch, da keine ausreichenden Ruhezeiten bestehen
- Marktpotenzial (2014): ~650 MW
- Vergütung erfolgt über den Leistungspreis
- Mittlerer gewichteter Leistungspreis (2014) = 21 €/MW*h
- Gewinn = PRL-Leistungspreis - Investitionen - Betriebskosten (+/- Stromhandel)

## Anforderungen

**Regulatorische und organisatorische Anforderungen:**

- Marktseitige Bewirtschaftung durch einen Speicherpoolbetreiber in einem Anlagenportfolio
- Ausschreibungsdauer: 1 Woche
- Mindestangebotsgröße: +/- 1 MW
- Vollständige Aktivierung innerhalb von 30 Sekunden
- Präqualifikation: Nachweis von 15 bzw. 30 Minuten in beide Richtungen (Pool bzw. Stand-Alone-Speicher)

**Technische Anforderungen:**

- Ggf. Zusammenschluss mehrerer Speicher
- Datenverbindung mit dem Poolbetreiber/ Anschluss-ÜNB
- Vollautomatischer Abruf: Frequenzabhängige Leistungsregelung
- Leistung: 1 MW (Mindestangebotsgröße)
- Kapazität: mind. 1 MWh (Auslegung abhängig von der Betriebsstrategie)
- Mittlerer SoC: mittel
- Mittlerer DoD: eher flach (abhängig von der Auslegung)
- Sicherheit: keine anwendungsspezifischen Anforderungen
- Benötigte Komponenten: Gehäuse, Verkabelung, Kommunikationsbox, Frequenzmessung, Steuerungscomputer, Wechselrichter

**Einsatzzweck:** Beitrag zur Netzstabilität

**Erlös-/Kostenreduktionspotenzial**: Erlöse am Regelleistungsmarkt für vorgehaltene Leistung

**Anforderungen:** Ratio (Leistung/Kapazität) maximal 1 mit flachen Be- und Entladezyklen

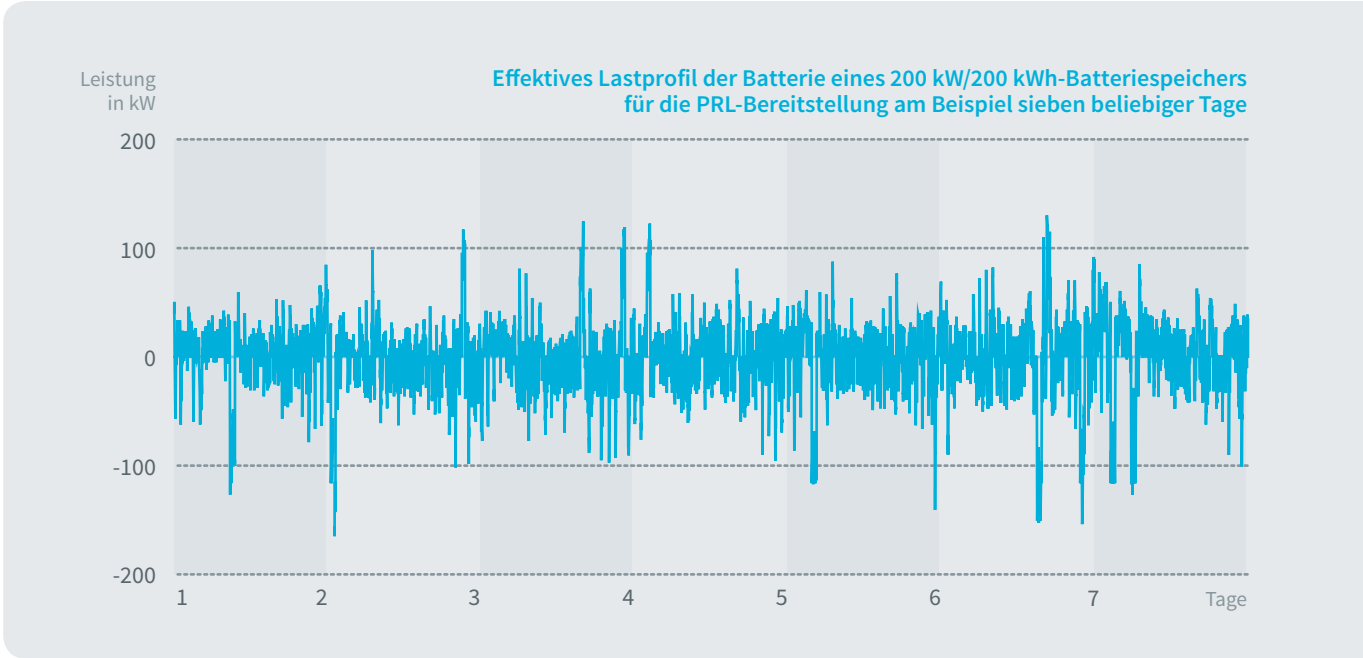
**A17:** Steckbrief für die Bereitstellung von PRL

## Lastprofil

Für die Bestimmung des Lastprofils wird auf Daten und Annahmen aus dem Forschungsprojekt EEBatt (111) (112) zurückgegriffen. Im Rahmen von EEBatt wurden für einen Feldtest Lastprofile eines realen Speichers in verschiedenen Betriebsstrategien vorab simuliert. Das PRL Lastprofil basiert auf der zu erfüllenden P(f)-Kennlinie, die sich aus der Frequenzabweichung und der angebotenen Leistung ergibt, sowie der gewählten Betriebsstrategie für das Batterielademanagement. Als Betriebsstrategie zur Wiederherstellung eines SoC = 50 % werden neben dem Intraday-Handel (bzw. dem Bezug aus anderen technischen Einheiten im Pool) die Nutzung der drei Freiheitsgrade optionale Übererfüllung, Nutzung des Totbandes und Anpassung des Leistungsgradienten gewählt. Es wird ein Speicher mit einer maximalen Leistung von 200 kW und einer Speicherkapazität von 200 kWh (180 kWh nutzbar) betrachtet, welcher in einem Anlagenpool mit uneingeschränkter Arbeitsverfügbarkeit agiert. Weiterhin werden Verluste von jeweils 10 % für den Lade- und Entladevorgang angenommen.

Für die Batterie ergibt sich unter den erläuterten Annahmen und Randbedingungen das Lastprofil in Abbildung A18. Da sich die jahreszeitlich

**A18:** Effektives Lastprofil der Batterie eines 200 kW/200 kWh-Batteriespeichers für die PRL-Bereitstellung am Beispiel sieben beliebiger Tage



bedingten Schwankungen der Netzfrequenz nicht in den grundsätzlichen Charakteristika des Lastprofils widerspiegeln, wird exemplarisch das Lastprofil für sieben beliebige Beispieltage dargestellt.

Die Auswertung zeigt zudem, dass durch die gewählte Betriebsstrategie im Mittel ein SoC von ca. 50 % erreicht wird. Zudem werden nur selten SoC > 80 % bzw. < 20 % erreicht. Schließlich finden sich alle relevanten Kennwerte für die PRL-Bereitstellung in Tabelle T01. Es sei hierbei nochmals angemerkt, dass seit Erscheinen der neuen Auflagen für PRL-Speicher in (104), diese Dimensionierung nur unter speziellen Anforderungen in einem konventionellen Kraftwerkspark möglich ist.

| | |
|---|---|
| Max. Lade/Entladeleistung | 200 kW |
| Speicherkapazität (nutzbar) | 200 (180) kWh |
| Energetischer Wirkungsgrad | 81 % |
| Mittlere Entladeleistung | 34 kW |
| Ladeenergie (Netzbezug) | 85 MWh |
| Verluste | 16 MWh |
| Energiedurchsatz | 69 MWh |
| Äquivalente Vollzyklen | 383 ÄVZ/a |
| Mittlerer SoC | 50 % |
| Maximaler DoD | 90 % |

**T01:** Kennwerte für die PRL-Bereitstellung

### 8.3.1.2 Hausspeichersysteme

#### Kurzbeschreibung

Die starke Verbreitung von Photovoltaik (PV)-Anlagen in Deutschland wurde angereizt durch Subventionen je produzierter kWh (durch das EEG), die bei einem unerwartet starken Preisverfall von PV-Modulen zu einem lukrativen Geschäft und rasanten Zubau in Deutschland in den Jahren 2000–2010 führten. Heutige EEG-Fördersätze für PV-Neuanlagen sind hingegen an die neuen PV-Systempreise angepasst und wesentlich geringer. Seit ca. 2011 wird die Einspeisung von Neuanlagen geringer vergütet, als der haushaltsübliche Strom-Bezugspreis von damals ca. 25 ct/kWh. Seither lohnen sich eine private Zwischenspeicherung von überschüssiger erzeugter Energie und die Ausspeicherung dieser Energie zu Zeiten hohen Energiebedarfs. Der sogenannte Eigenverbrauch des selbst produzierten

Stroms kann somit durch eine Speicheranlage erhöht werden. Der Eigenverbrauchsgrad beschreibt in diesem Zusammenhang die durch PV-Produktion gedeckte Last im Verhältnis zur gesamten PV-Produktion. Anstatt die überschüssige Leistung der PV-Anlage in das Netz einzuspeisen, kann diese Energie zwischengespeichert und in Zeiten ohne Sonneneinstrahlung wieder bereitgestellt werden. Sogenannte Hausspeichersysteme bieten Endverbrauchern die Möglichkeit den Eigenverbrauch ihrer PV-Anlagen und ggf. zukünftig deren Wirtschaftlichkeit zu erhöhen und schaffen so neue Anreize zur Investition in PV-Anlagen.

Ein HSS besteht im Wesentlichen aus einem elektrochemischen Speicher, der mit einer Steuerungselektronik und einem Wechselrichter verbunden ist. Das System wird i. d. R. am Hausanschluss angeschlossen.

### Markt

Nach dem US Marktforschungsinstitut IHS wird sich das globale Marktvolumen von netzgekoppelten PV-Anlagen mit Speichern zwischen den Jahren 2014 mit 90 MW auf 900 MW im Jahr 2018 verzehnfachen (113). In der Begleitforschung zum KfW-Förderprogramm der RWTH Aachen und dem „Institute for Power Electronics and Electrical Drives“ wurde die Anzahl der im Jahr 2014 in ganz Deutschland zugebauten PV-Speicher auf insgesamt 10111 Stück beziffert, was einen Anteil der PV-Anlagen mit Speicher von 13,4 % ausmacht. Die durchschnittliche nutzbare Kapazität pro PV-Speicher lag bei 6,6 kWh, so dass dieser Zubau einer kumulierten nutzbaren Batteriekapazität von ca. 67 MWh entspricht. Bei den in der Begleitforschung registrierten Speichersystemen waren 43 % der Speicher mit Pb-Batterien und 57 % mit LIB ausgestattet. (114) Mit dem Auslaufen der EEG-Vergütung für PV-Anlagen, die älter als 20 Jahre sind, könnte zukünftig eine erhöhte Nachfrage an PV-Speichern bestehen, da diese dann ausschließlich von einer verbesserten PV-Eigennutzung profitieren würden.

Im Jahr 2014 lag nach (115) der Kostenanteil einer 5 kWh-Batterie mit Lithium-Ionen-Technologie bei ca. 51 % des gesamten Verkaufspreises des Speichersystems, im Falle einer Blei-Technologie lag er bei 44 %. Nach (116) ist seit Anfang 2014 der Preisindex für Speichersysteme gesunken, wobei der Rückgang bei der Blei-Technologie stärker war als bei der Lithium-Ionen-Technologie. Abweichend hierzu gibt (106) eine stärkere Preisdegression für LIB an als für Pb-Batterien.

**A19:** Steckbrief für den Einsatz als HSS

## Anforderungen

Die technischen Anforderungen an den Speicher sind im Wesentlichen abhängig von PV-Anlagenleistung, Stromverbrauch des Haushalts sowie angestrebtem Eigendeckungsgrad. HSS für private Haushalte verfügen üblicherweise über Leistungen zwischen 1–10 kW. In Süddeutschland kann von einer täglichen tiefen Zyklisierung im Sommer und flacher Zyklisierung im Winter ausgegangen werden, wodurch sich etwa 200–300 ÄVZ pro Jahr ergeben. Die Kapazitäten liegen üblicherweise im Bereich 1–15 kWh, manche Hersteller bieten auch Modelle mit über 50 kWh an.

## Steckbrief

Die vorherigen Ausführungen werden in Abbildung A19 in einem Steck-brief zusammengefasst.

### Lastprofil

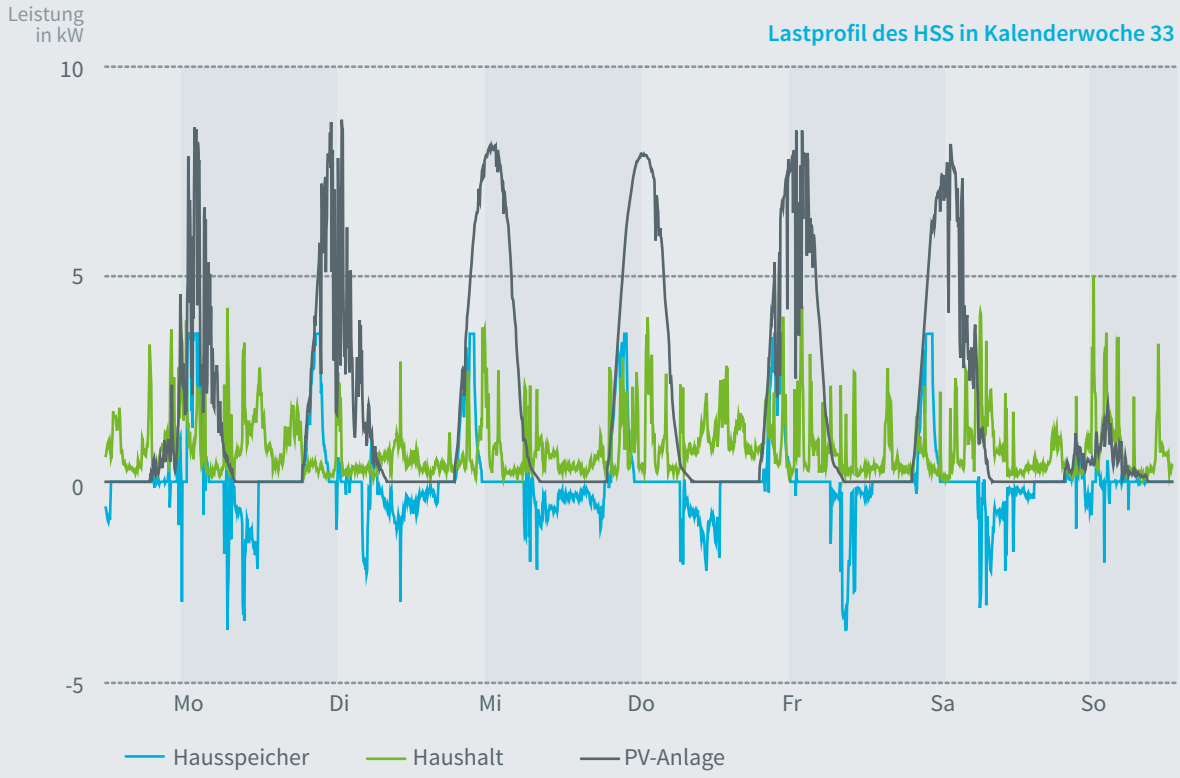
Im Rahmen des Projekts SmartGrid der Modellregion Garmisch-Partenkirchen (117) wurden Last- und Erzeugungsgänge von Einfamilienhäusern mit PV-Erzeugungsanlagen, HSS und BEV über ein Jahr simuliert, um Netzrückwirkungen und energetische Einflüsse in Niederspannungsnetzen zu analysieren. Für die folgenden Auswertungen wurde ein Lastprofil aus diesem Datensatz gewählt. Es handelt sich dabei um einen Mehrpersonenhaushalt mit einem Jahresstromverbrauch von 6760 kWh. Der PV-Erzeugungsgang stammt aus Messaufzeichnungen im Rahmen des Projekts (117). In folgender Tabelle sind die Eckdaten zu Last und Erzeugung des betrachteten Haushaltes aufgeführt.

| | |
|---|---|
| Jahresverbrauch des Haushalts | 6760 kWh |
| PV-Jahresertrag | 9328 kWh |
| Eigendeckungsanteil durch HSS | 1782 kWh |
| Installierte Leistung der PV-Anlage | 9,6 $kW_p$ |
| Kapazität des HSS (davon nutzbar) | 10 (7) kWh |
| Max. Lade-/Entladeleistung des HSS | 3,6 kW |
| BEV-Batteriekapazität | 37 kWh |
| DOD | 20–90 % |
| Energetischer Wirkungsgrad | 86,5 % |

**T02:** Kennwerte für das Lastprofil von HSS

Da der Markt für HSS derzeit noch sehr klein und der Einsatz von SL-Batterien in HSS noch nicht etabliert ist, wurde ein mögliches zukünftiges Fallbeispiel gewählt, in dem SL-Batterien bereits eine Alternative im HSS-Markt darstellen könnten. Der hier betrachtete Haushalt verfügt daher über einen relativ großen Speicher mit einer Kapazität von 10 kWh, davon 7 kWh nutzbar. Aktuell werden Speichersysteme im Median von ca. 5,7 kWh Nennkapazität angeboten, was den heutigen Bedarf wiederspiegelt. Dies ergab eine Marktanalyse, in der aktuell verfügbare Systeme verglichen wurden. Zukünftig werden die Kosten sowohl für PV-Anlagen als auch für Batteriespeicher fallen, weshalb ein Trend zu größeren Kapazitäten angenommen werden kann.

Neben HSS könnten PV-Anlagenbesitzer zukünftig auch Kaufinteressenten von BEV sein, da diese den Eigenverbrauch zusätzlich erhöhen können. In




**A20:** Lastprofil des HSS in Kalenderwoche 33

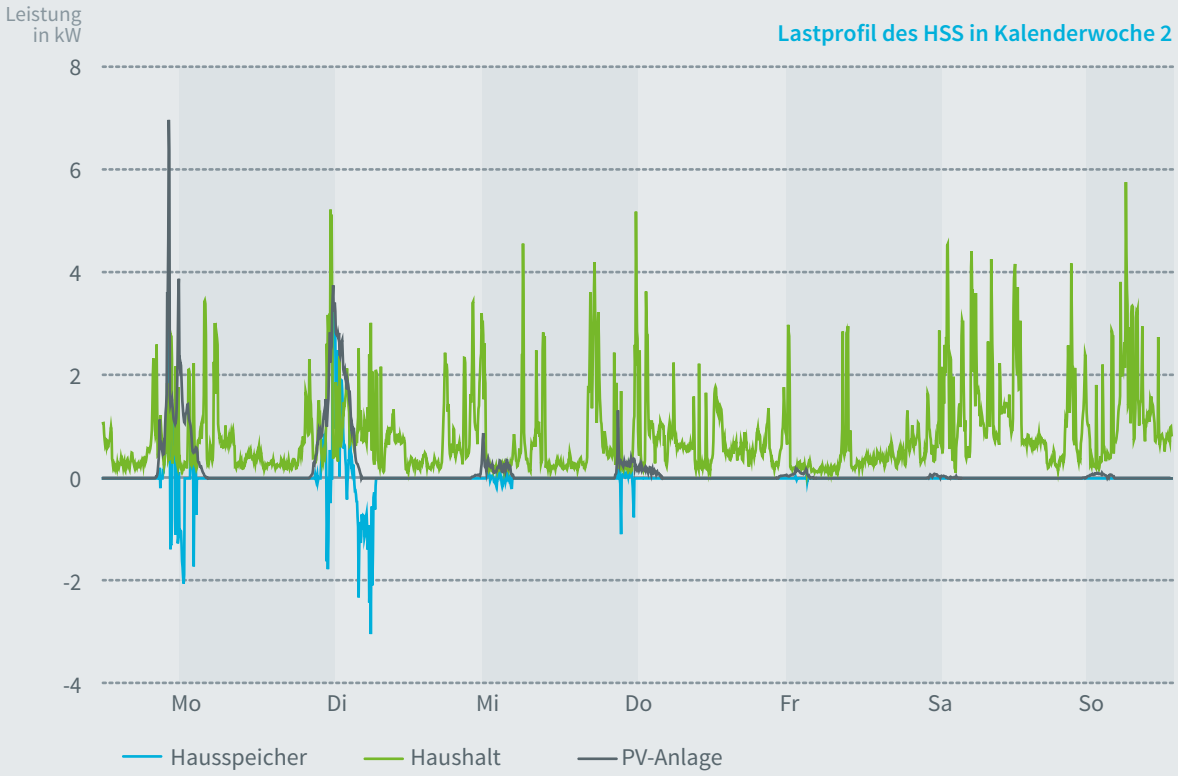
einer aktuellen Studie (118) wurden die soziodemographischen Merkmale von BEV-Käufern untersucht. Im Vergleich zu Studien, die sich mit der Zielgruppenanalyse von PV-Anlagenbesitzern beschäftigen (119) (120), geht hervor, dass Solaranlagen- und BEV-Besitzer ähnliche soziodemographische Merkmale wie Einkommen, Schulabschluss, Haushaltsgröße und Wohnort aufweisen. In dem hier betrachteten Fallbeispiel wird unter diesen Gesichtspunkten ein Haushalt mit BEV untersucht. In Abbildung A20 ist exemplarisch das ausgewählte Lastprofil in einer Sommerwoche (Kalenderwoche 33) dargestellt. In Blau ist der Lade- und Entladeverlauf der Batterie dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Batterie fast täglich vollständig entladen wird, so dass abends nicht mehr genug gespeicherte Energie zur Verfügung steht, um die Last (grün) vollständig zu decken.

Im betrachteten Jahresprofil wird die Batterie pro Tag im Mittel mit 5,6 kWh zyklisiert (52 % DoD), in der Zeit von Juni bis August sogar mit 7 kWh pro Tag. Das entspricht pro Jahr etwa 567 Volllaststunden mit 252 ÄVZ, die mittlere Ladeleistung beträgt ca. 800 W.

Im Winter ist die solare Einstrahlung so gering, dass der Speicher an vielen Tagen kaum oder gar nicht genutzt wird. Dies ist exemplarisch in Abbildung A21 für die zweite Kalenderwoche dargestellt.

### 8.3.2 Weitere Anwendungen

Im Folgenden werden die weiteren, als interessant befundenen Anwendungsfälle kurz beschrieben und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt.




A21: Lastprofil des HSS in Kalenderwoche 2

### 8.3.2.1 Notstromversorgung

Eine kontinuierliche Stromversorgung gleichbleibender Qualität durch das öffentliche Stromnetz kann durch verschiedene Störungen gefährdet werden. Störungen können z. B. durch einen Stromausfall, Überspannungen, Spannungseinbrüche oder Blitzeinwirkungen hervorgerufen werden. Für eine Vielzahl von Verbrauchern hätte eine Unterbrechung der Stromversorgung weitreichende Folgen. Entsprechend muss für diese Fälle eine Notstromversorgung sicher gestellt sein. Die Notstromversorgung wird unterteilt in unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und Netzersatzanlagen (NEA). Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) hat hierzu einen Leitfaden „Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden“ herausgegeben (121) (122).

**→ Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)**

#### Kurzbeschreibung

Die USV-Anlagen dienen zur Aufrechterhaltung der Stromversorgung für einen kurzen Zeitraum und werden als Überbrückung zwischen einem Störfall und dem Zuschalten von NEA bzw. dem Wiedererreichen eines stabilen Betriebszustandes eingesetzt. Typische Einsatzzwecke sind der Schutz von Hardware, die Aufrechterhaltung von Dienstleistungen durch Server oder die Gewährleistung eines kontinuierlichen Betriebs von sensiblen Anlagen und Geräten. Derzeit werden in USV-Anlagen vor allem Pb-Batterien verbaut. In der Norm IEC 62040-3 erfolgt eine Klassifizierung der USV in drei Stufen. In der ersten Stufe erfolgt eine Einteilung in

die Klassen VFI, VI und VFD entsprechend der Abhängigkeit des Ausgangs von der Netzspannung und der Netzfrequenz. Jeder dieser Klassen können Störungsarten zugeordnet werden. In der zweiten Stufe erfolgt eine Einteilung anhand der Ausgangs-Kurvenform und des Verzerrungsfaktors. Die dritte Stufe gibt das Spannungsverhalten des USV-Ausgangs anhand von Toleranzkurven an (121) (123) (124) (125) (126).

### Markt

In Deutschland wird die USV derzeit vor allem in Rechenzentren eingesetzt. Weitere Märkte sind z. B. Finanzsysteme, Kreditkartenanwendungen, Marineanwendungen und Rundfunk. Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und möglichen gesteigerten Netzschwankungen kann in Zukunft ein höheres Marktvolumen der USV-Anlagen erwartet werden. (124)

### Anforderungen

USV-Anlagen können von einigen Sekunden bis hin zu einer Stunde eingesetzt werden. Im Jahr 2011 dauerten ca. 97 % aller Störungen weniger als drei Sekunden. (126)

Die anspruchsvollste Klasse, VFI, in der die USV-Anlagen Dauerwandler sind, erfordert keine Umschaltzeit. Typische Anwendungsbereiche sind sicherheitskritische und sensible Verbraucher wie Server, IT-Anwendungen, Steuer- und Sicherheitssysteme. Während es in der Klasse der VI zu Umschaltzeiten von 1 bis 10 ms bei maximalen Leistungswerten von 3 kW kommt, kommt es in der Klasse VFD zu Umschaltzeiten von bis zu 20 ms bei Leistungen von bis zu 1,5 kW. Typische Anwendungsbereiche hierfür sind Kleinstverbraucher wie z. B. einzelne Computer. (127)

Der auszulegende Leistungsbereich richtet sich nach den zu versorgenden Geräten. Empfohlen wird eine Leistungsüberdimensionierung von 25 % um eventuelle Lastspitzen abdecken zu können. Vor allem in Rechenzentren werden USV-Anlagen auch parallel aufgebaut, um eine Redundanz zu schaffen. Fällt eine USV-Anlage aus, kann mit der anderen Anlage die Stromversorgung aufrechterhalten werden, was eine erhöhte Versorgungssicherheit mit sich bringt. (128) (129)

ABB bietet USV-Systeme im Leistungsbereich von 1 kW bis 5 MW an. Wird von einer Einsatzzeit von drei Sekunden ausgegangen, so ergeben sich Kapazitätswerte von 0,83 Wh bis 4,17 kWh. Bei einer Einsatzzeit von einer Stunde würde die erforderliche Kapazität entsprechend auf 1 kWh bis 5 MWh steigen. (130)

→ **Netzersatzanlagen (NEA)**

## Kurzbeschreibung und Markt

Um trotz eines Stromausfalls weiterhin mit elektrischer Energie versorgt zu werden, haben wichtige und zentrale Verbraucher, wie z. B. Krankenhäuser, Verkehrsbetriebe, Rechenzentren oder Industrieunternehmen, eigene NEA und sind somit im Notfall unabhängig vom öffentlichen Versorgungsnetz. Besonders in kritischen Bereichen, die die Gefährdung von Leben, von Sicherheit oder von dem Funktionieren der Gesellschaft zur Folge hätten, finden NEA Anwendung. In den NEA kommen neben Notstromaggregaten mit einem Generator und Dieselmotor auch Brennstoffzellen und Batterien zum Einsatz. (122)

## Anforderungen

Die Notstromversorgung muss einen hohen Grad an Verlässlichkeit aufweisen und permanent einsatzbereit sein. Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) empfiehlt eine Dimensionierung der Notstromversorgung für einen mindestens 72-stündigen Einsatz. Der von der Bundesnetzagentur ermittelte System Average Interruption Index (SAIDI), der die durchschnittliche Versorgungsunterbrechung pro Letztverbraucher pro Jahr ermittelt, lag im Jahr 2013 in Deutschland bei 15,32 Minuten. Für die Bestimmung des genauen Kapazitätsbedarfs müssen die im Notfall zu versorgenden Infrastrukturen und Arbeitsmittel definiert werden und gegebenenfalls Leistungsreserven für z. B. Startvorgänge berücksichtigt werden. Leistungen bewegen sich üblicherweise im Rahmen von 20 kW bis 1,7 MW. Die Anlaufzeit der NEA mit herkömmlichen Dieselaggregaten liegt zwischen 5 und 15 Sekunden. (122) (131) (132)

Da in Deutschland aktuell ein hoher Grad an Versorgungssicherheit herrscht, kommen NEA sehr selten zum Einsatz, es wird vom BBK jedoch empfohlen mindestens einmal pro Jahr den Einsatzfall zu proben. Entsprechend ist auch von einer sehr geringen Zyklenzahl auszugehen. (122) (133)

Um Wartungsarbeiten zu ermöglichen, können die NEA in mehrere Module unterteilt werden. Die Module müssen so dimensioniert werden, dass auch bei Wartungsarbeiten eines Moduls die Versorgungssicherheit gewährleistet ist. Regelmäßige Wartungsarbeiten und Funktionstests sind bei NEA unerlässlich, da eine volle Funktionsfähigkeit zu jedem Zeitpunkt gegeben sein muss. (122)

Für kleine Rechenzentren bietet der Hersteller EPS Rechenzentrum Infrastruktur GmbH bereits Dieselaggregate mit Leistungen von 20 kW bis 150 kW an. Bei einer Dimensionierung für 72 Stunden entspricht dies einer Kapazität von 1,44 MWh bis 10,8 MWh. Für das Berliner Charité Krankenhaus hingegen wird mit einer Leistung von 1,7 MW und einer Einsatzzeit von bis zu 50 Stunden geplant, welches einem Kapazitätswert von 85 MWh entspricht. (134) (135)

Aufgrund der erhöhten Sicherheitsanforderungen dieses Anwendungsfalls ist ein Einsatz von SL-Batterien für die Notstromversorgung als kritisch anzusehen. Zudem sollte der Wartungsaufwand für USV-Anlagen und NEA auf ein Minimum begrenzt werden, welches einem Einsatz von gebrauchten Bauteilen widerspricht.

#### 8.3.2.2 Flurförderzeuge

##### Kurzbeschreibung

Flurförderzeuge (FFZ) sind innerbetriebliche Fördermittel, welche mit den Rädern Bodenkontakt haben und frei lenkbar sind. Übliche Anwendungen in der Intralogistik sind das Befördern, Ziehen und Schieben von Gütern. Ausgestattet mit Hubeinrichtungen, können sie weitere Aufgaben, wie z. B. das Heben oder Stapeln von Gütern, ausführen. Typische elektrisch angetriebene FFZ sind Hubwagen, Gabelstapler, Transportwagen, Kommissionierer und Schlepper. In FFZ werden derzeit hauptsächlich Pb-Batterien eingesetzt. (136) (137)

##### Markt

Der Weltmarkt für FFZ stieg 2013 erstmals über eine Million Einheiten, bei den Neuzulassungen. Das stückzahlenbezogene Marktvolumen lag im Jahr 2013 bei 40 % in Asien, gefolgt von Europa mit 31 %, Nordamerika mit 20 % und 9 % aus den restlichen Teilen der Welt. Weltmarktführer im Jahr 2012/2013 war Toyota Industries Corp. mit einem Umsatz bei den motorisierten FFZ von 5,7 Milliarden Euro, gefolgt von den beiden deutschen Unternehmen Kion und Jungheinrich. Der Anteil an elektromotorischen Gabelstaplern ist in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen und liegt derzeit im Falle einer Betrachtung des Gesamtmarkts bei rund zwei Drittel der neu ausgelieferten Fahrzeuge. (138) (139) (140)

### Anforderungen

Mit dem Ziel einen herstellerübergreifenden Einsatz von Batterien in FFZ zu ermöglichen wurden Batterienormen definiert. In den Normen sind Außenabmessungen, Gewicht, Bauweise, Spannung, Verschaltung und Kapazität festgelegt. Es gibt drei Normen für die Nennspannungen: DIN 43536 für 24 V, DIN 43531 für 48 V und DIN 43536 für 80 V. Unterteilt sind diese wiederum in Schaltung A, B oder C. Die geforderten Spannungen der jeweiligen Norm entsprechen auch den in ISO 1044 und VDE 0117 festgelegten Vorzugsspannungen. Sie werden durch Serienschaltung der Pb-Batterien mit jeweils 2 V pro Zelle erreicht. Die einzelnen Zellen wiederum sind nach DIN EN 60254-2 und IEC 60254-2 hinsichtlich der Kapazität, der Abmessung und des Gewichtes genormt. Die Batterieanlagen in FFZ unterliegen weiteren Sicherheitsanforderungen für Konstruktion und Betrieb (u. a. Belüftungsangaben, Isolationswerte, Grenzwerte für Ladestrom und Spannung, Batterietröge, Steckvorrichtungen, Schutzmaßnahmen) und müssen auch hinsichtlich der Reinheitsanforderungen der Elektrolyte und des Nachfüllwassers bestimmte Anforderungen erfüllen. (141) (142)

Die Kapazität wird üblicherweise als K5-Wert angegeben, dieser entspricht der erzielbaren Kapazität bei einer fünfstündigen Entladung. In den Batterienormen reichen die K5-Werte von 120-1600 Ah. Repräsentativ für Gabelstapler wird der EFG 216 von Jungheinrich mit einer Tragfähigkeit von 1,6 Tonnen und einem Energieverbrauch nach VDI-Zyklus von 4,4 kWh je Betriebsstunde betrachtet (143). Ausgestattet ist dieser mit einer Pb-Batterie mit einer Spannung von 48 V und einer Nennkapazität K5 von 750 Ah (143). Bei einem üblichen DoD von maximal 80 % ergibt sich bei einer vollgeladenen Batterie ein nutzbarer Energieinhalt von 28,8 kWh. Wird weiter von einem Wirkungsgrad der Traktionsbatterie von 72 % (144) und einem Energieverbrauch des Gabelstaplers analog zu dem VDI-Zyklus ausgegangen, so könnte dieser Gabelstapler unter Vernachlässigung der Selbstentladung 4,7 Stunden betrieben werden. Bei einem Zweischichtbetrieb mit 4032 Betriebsstunden (145) des FFZ pro Jahr würden sich somit in etwa 856 ÄVZ pro Jahr ergeben.

Durch eine seitliche Türöffnung am Gabelstapler ist ein direktes Laden möglich. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit die Batterie mittels eines Wechselsystems zu tauschen. Durch die starke Reglementierung von FFZ-Batterien ist der Einsatz von SL-Batterien, welche hinsichtlich Gewicht, Bauweise, Spannung, Verschaltung und Kapazität je nach Hersteller variieren, derzeit nur schwer möglich. Zudem ist die Zyklisierung der Batterie im alltäglichen Betrieb sehr hoch, welches den Einsatz einer SL-Batterie zusätzlich erschwert.

### 8.3.2.3 Spitzenlastmanagement

#### Kurzbeschreibung

Die Berechnung des Strompreises für gewerbliche Kunden erfolgt anhand des Arbeits- und Leistungspreises. Der Leistungspreis basiert auf dem maximalen in einem bestimmten Zeitintervall gemessenen Leistungswert und wird spezifisch in €/kW angegeben. Somit bewirkt eine Reduktion der Spitzenlast eine Senkung des Strompreises. Bei großen Verbrauchern können Lastspitzen mittels des Einsatzes einer Batterie reduziert werden, welche dann zu Schwachlastzeiten wieder geladen werden. (146)

#### Anforderungen

Aus einer Studie von J. Eyer und G. Corey geht hervor, dass Batterien im Einsatz zum Spitzenlastmanagement Leistungen von wenigen kW bis in den mehrstelligen MW-Bereich über eine Zeitspanne von mehreren Stunden erbringen müssen, um Hochlastzeiten komplett abzudecken (147). Für eine genaue Auslegung ist eine Einzelfallbetrachtung notwendig, da diese von vielen Faktoren, wie z. B. von der Verbrauchergröße, der angestrebten Lastreduktion, der Dauer der Lastspitze und der Fluktuation der Last, abhängt.

Ein Einsatz von SL-Batterien zur Reduktion von Leistungsspitzen ist prinzipiell möglich und kann zu einer erheblichen Reduktion der Stromkosten führen. Die wirtschaftliche Darstellbarkeit muss jedoch für jeden Einzelfall getrennt betrachtet werden, da das Alterungsverhalten der Batterie und die Höhe der Kostenreduktion vom dem jeweiligen Lastprofil abhängig ist.

### 8.3.2.4 Leistungspuffer für Schnellladesäulen

#### Kurzbeschreibung

Um der steigenden Anzahl an EV gerecht zu werden, bedarf es eines Ausbaus der Ladeinfrastruktur. Besonders an öffentlichen Plätzen eignen sich dabei netzgekoppelte Ladestationen mit einer Schnellladefunktion, die aufgrund höherer Leistungen kürzere Ladezeiten ermöglichen. Jedoch bedeutet der hohe Leistungsbedarf dieser Schnellladesäulen eine zusätzliche Belastung des Stromnetzes. Durch eine Ausstattung der Ladesäulen mit einer Pufferbatterie können Leistungsspitzen abgefangen und somit Belastungen des Netzes entgegengewirkt werden. (148)

### Markt

Im Jahr 2014 gibt es ca. 4800 herkömmliche Ladesäulen und ca. 100 Schnellladesäulen in Deutschland, welche öffentlich zugänglich sind (149). Demgegenüber stehen im Jahr 2014 ca. 24000 EV. Die Nationale Plattform für Elektromobilität (NPE) möchte mit dem Combined Charging System (CCS) ein internationales Ladesystem schaffen. Hierbei werden Wechselstromladungen bis maximal 40 kW und Gleichstromladungen bis maximal 300 kW angestrebt. Die NPE empfiehlt bis zum Jahr 2020 einen massiven Ausbau von Ladeinfrastruktur im öffentlichen Bereich. In Hamburg gibt es bereits ein Pilotprojekt von Vattenfall und der BMW Group, in dem Schnellladesäulen mit SL-Batterien als Leistungspuffer ausstattet werden. Dieses Projekt ist inzwischen in den Regelbetrieb übergegangen. (106) (149)

### Anforderungen

Als Schnellladung wird i. d. R. eine Ladung der Batterie auf 80 % in weniger als einer halben Stunde bezeichnet. Beginnt eine Ladung aus Sicherheitsgründen bereits bei einem SoC = 20 %, so müssten nur noch 60 % nachgeladen werden (150). Die Pufferbatterie einer Ladesäule wurde im Pilotprojekt in Hamburg auf vier bis fünf aufeinanderfolgende Autos ausgelegt (106). Bei einer Ladedauer von ungefähr einer halben Stunde pro Fahrzeug entspräche dies einer Auslegung auf insgesamt ca. 2 bis 2,5 Stunden.

Wird der BMW i3 mit einem Nennenergieinhalt der Batterie von 21,6 kWh betrachtet, so entsprechen 60 % ca. 13 kWh (151). Bei einer Ladezeit von einer halben Stunde ergibt dies eine Leistung von 26 kW. Die Batterie müsste bei vier bis fünf Fahrzeugen dieser Dimension somit auf eine Energiemenge von 52 bis 65 kWh ausgelegt werden. Für dieses Beispiel müsste bei einer ununterbrochenen Nutzung der Ladesäule mit vier bis fünf BMW i3 die Pufferbatterie nach 2 bis 2,5 Stunden wieder erneut vollgeladen werden. Entsprechend würden sich pro Tag maximal 9 bis 12 Vollzyklen und pro Jahr 3504 bis 4380 Zyklen ergeben. In Realität ist jedoch von einer niedrigeren Zyklenzahl auszugehen, da es zu Wechselzeiten zwischen den Ladevorgängen kommt und die Ladesäulen derzeit noch nicht voll ausgelastet sind.

Grundsätzlich sind SL-Batterien für den Einsatz als Leistungspuffer an Schnellladesäulen geeignet und erste Pilotprojekte sind bereits erfolgreich in Betrieb. Es gilt jedoch zu beachten, dass sich die für eine Schnellladung erforderlichen hohen C-Raten negativ auf die Lebensdauer der Batterie auswirken können, so dass ggf. eine Überdimensionierung sinnvoll wäre.

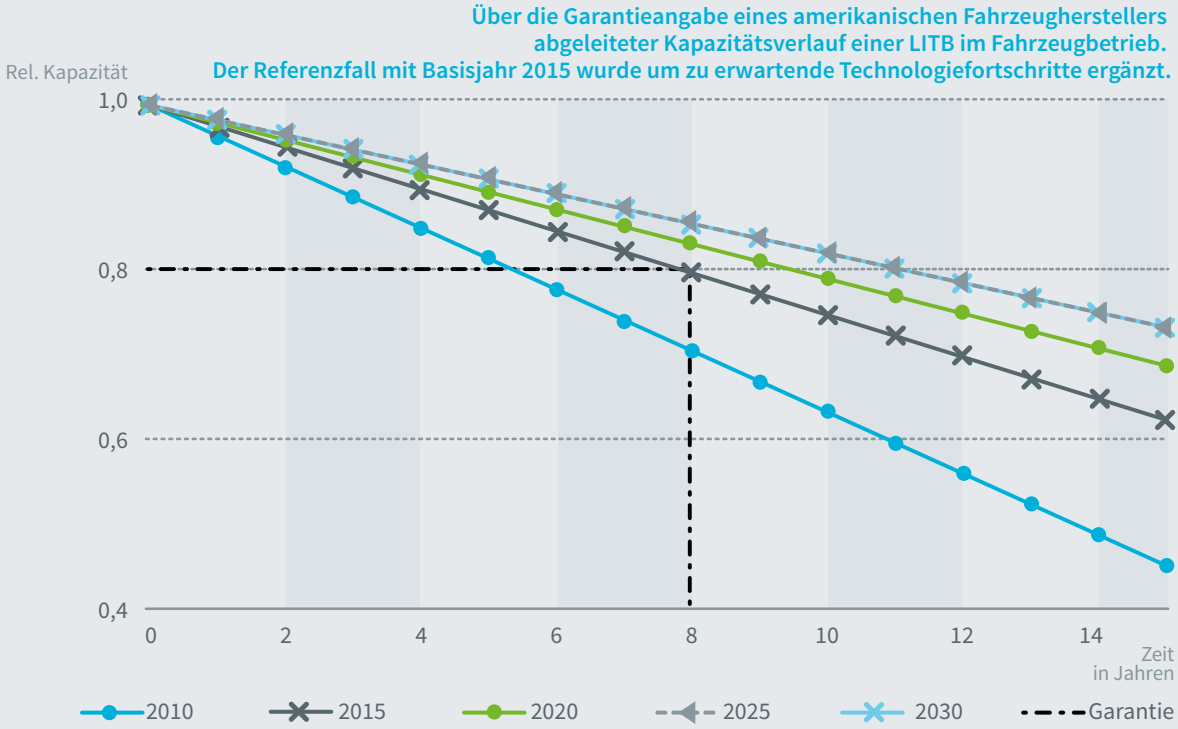
# 9 Modellierung des Alterungsverhaltens

Nach der Vorstellung der ausgewählten Anwendungen (Bereitstellung von PRL und HSS) und insbesondere der angenommenen Lastprofile, wird in diesem Kapitel das für die Berechnung der Alterungsverläufe zugrunde liegende Alterungsmodell beschrieben. Die damit generierten Ergebnisse finden im Anschluss direkten Einzug in die Wirtschaftlichkeitsbewertung der beiden Anwendungen. Das verwendete ersatzschaltbildbasierte (ESB-basierte) Alterungsmodell orientiert sich im Wesentlichen an (70), und wurde mit dem Alterungsdatensatz aus (76) (LIZ mit Graphit-Anode und NMC-Kathode) parametriert. Die Details des Modells werden in (152) dargestellt.

## 9.1 Fahrzeugbetrieb über Garantieangaben

Prinzipiell unterteilt sich das Alterungsverhalten in einem SL-Konzept stets in jenes während des Fahrzeugbetriebs sowie jenes in der SL-Anwendung. Bei der Alterung der LITB im BEV kann es hierbei zu einer Vielzahl an verschiedenen Ausmaßen hinsichtlich der Belastung des Batteriespeichers kommen. So unterscheiden sich die Lastprofile verschiedener BEV durch variierende Batterieauslegung, die i. d. R. an die erzielbare Reichweite sowie Beschleunigung der Fahrzeuge angepasst wird. Selbst in identischen BEV kommt es allerdings aufgrund unterschiedlicher Fahrstile (mild, aggressiv, etc.) oder klimatischer Bedingungen zu abweichendem Alterungsverhalten (91).

Eine Möglichkeit das zu erwartende Alterungsverhalten im BEV möglichst allgemeingültig und mit Praxisbezug abzubilden, stellt das Heranziehen der Garantieangaben von Fahrzeugherstellern dar (11) (82). Ein bekannter deutscher bzw. amerikanischer Hersteller garantiert derzeit eine Restkapazität von 70 % bzw. 80 % nach 8 Jahren Betriebszeit. Um die Vergleichbarkeit zu anderen Studien zu gewährleisten (E01L = 80 %), gilt im Folgenden die Garantieangabe des amerikanischen Fahrzeugherstellers mit einer Restkapazität von 80 % nach 8 Jahren als Referenz. Grundsätzlich sollte bedacht werden, dass die Alterung zukünftiger LIZ-Modelle verglichen mit aktuellen Modellen durch Technologiefortschritte langsamer ablaufen könnte. Abbildung A22 zeigt den abgeleiteten Verlauf der Kapazität einer LITB im Fahrzeugbetrieb. Dabei wurden die bekannten Werte (100 % im Neuzustand und 80 % nach 8 Jahren) linear inter- und extrapoliert. Zusätzlich zum Referenzfall mit Basisjahr 2015 sind davon abweichende Verläufe dargestellt, welche die zuvor erwähnten technologischen Fortschritte abbilden. Dabei wurde die prognostizierte Entwicklung der kalendarischen und zyklischen Alterung von LIZ-Modellen bis 2030 nach (153) verwendet. Ab 2025 liegt ein stabiler Wert vor, weswegen die Verläufe für LIZ-Modelle aus 2025 und 2030 deckungsgleich sind.




**A22:** Über die Garantieangabe eines amerikanischen Fahrzeugherstellers abgeleiteter Kapazitätsverlauf einer LITB im Fahrzeugbetrieb. Der Referenzfall mit Basisjahr 2015 wurde um zu erwartende Technologiefortschritte ergänzt.

Der beschriebene Ansatz zur näherungsweisen Quantifizierung des Alterungsverlaufs im Fahrzeugbetrieb wurde hier lediglich ergänzend beschrieben. Die Verläufe finden nur geringfügig Verwendung in anstehenden Berechnungen: Da stets ein E01L = 80 % angesetzt wird, ist es ausschließlich von Interesse, wie lange es dauert bis die LITB diese Restkapazität erreicht. Der E01L liegt demnach für den Referenzfall mit Basisjahr 2015 nach 8 Jahren vor. Für LITB mit LIZ aus 2010, 2020 bzw. 2025 (und somit auch 2030) wird der E01L nach 5,5 Jahren, 9,7 Jahren bzw. 11,3 Jahren erreicht. Es muss hierbei bedacht werden, dass diese Werte eigentlich beschreiben, wann LITB aus dem Fahrzeugbetrieb ausscheiden und für eine SL-Anwendung verfügbar werden. In dieser Studie wird allerdings stets angenommen, dass SL-Batterien verfügbar sind und für jede einzelne auch Nachfrage besteht. Aufgrund des derzeit geringen Absatzes an BEV in Deutschland werden SL-Anwendungen hierzulande in den kommenden Jahren auf ein Nischendasein beschränkt sein, siehe hierzu auch Kapitel 6.3. Für das zu erwartende, geringe Angebot an SL-Batterien erscheint eine ausreichende Nachfrage daher als wahrscheinlich, sofern SL-Anwendungen aus ökonomischer Sicht grundsätzlich attraktiv sind. Für höhere Produktionsraten erscheint eine Spezialisierung auf Modultypen einzelner Hersteller sinnvoll, da dadurch Produktionsprozesse besser standardisiert werden können.

## 9.2 Ersatzschaltbildbasierter Ansatz

Im Gegensatz zum Alterungsverhalten im BEV ist das Alterungsverhalten nach dem E01L bis zum Erreichen des E02l von maßgeblicher Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit einer SL-Anwendung. Daher wird für die ausgewählten SL-Anwendungen ein komplexeres, ESB-basiertes Alterungsmo-

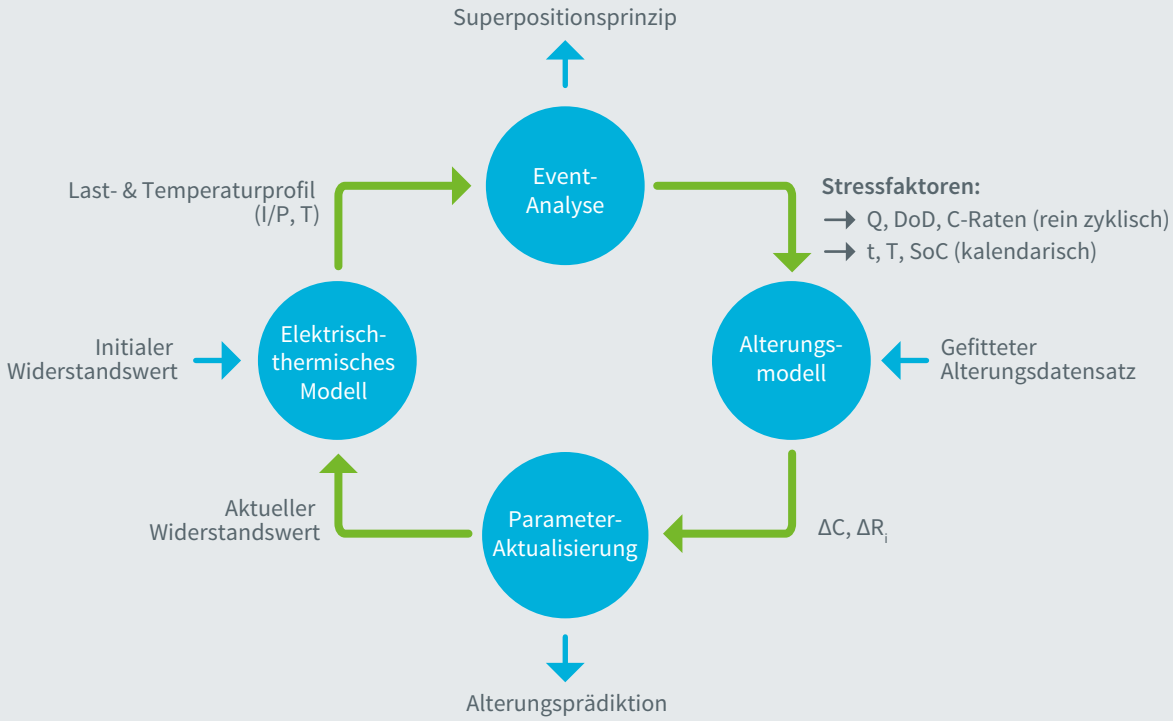
dell verwendet. Dessen Funktionsweise wird im folgenden Unterkapitel so kurz wie möglich beschrieben, denn Hauptaugenmerk dieser Studie liegt auf den ermittelten Ergebnissen sowie deren Interpretation. Für einen detaillierten Einblick in die Funktionsweise wird hingegen auf (152) verwiesen.

### 9.2.1 Funktionsweise

Abbildung A23 zeigt eine schematische Darstellung der Funktionsweise des verwendeten alterungsberücksichtigenden Gesamtmodells, mit dem Alterungsverläufe des untersuchten Zelltyps in beliebigen Anwendungen berechnet bzw. vorhergesagt werden können. Grundlage des Modells ist ein elektrisch-thermisches ESB-Modell, welches das elektrische sowie thermische Verhalten des untersuchten Zelltyps beschreibt. Das thermische ESB-Modell wird benötigt, um die Erwärmung einer Batterieeinheit durch polarisationsbedingte thermische Verluste in der Alterungssimulation zu berücksichtigen. Als Eingangsgrößen des elektrisch-thermischen ESB-Modells werden das Leistungsprofil (bzw. Stromprofil), die Umgebungstemperatur sowie ein Start-SoC benötigt. Das Lastprofil wird während der Simulation analysiert, und so genannte „Stressfaktoren" berechnet, womit der Alterungsfortschritt je „Event" quantifiziert wird.

Grundsätzlich existieren zwei unterschiedliche Events: Zum einen das zyklische Event, in dem zyklische Alterung auftritt, sowie das kalendarische Event, welches die kalendarische Alterung beschreibt. Für ein kalendarisches Event werden die Stressfaktoren Zeit, Temperatur und SoC während der Event-basierten Lastprofil-Analyse ermittelt. Für ein zyklisches Event stellen der Ladungsdurchsatz Q, der DoD und die mittleren C-Raten die Stressfaktoren dar. Dabei beruht die Event-basierte Lastprofilanalyse auf dem Superpositionsprinzip, welches annimmt, dass auch während eines zyklischen Events kalendarische Alterung auftritt. Daher wird bei einem Zyklen-Event (in Lade- oder Entladerichtung) auch der Anteil einer kalendarischen Alterung durch die Zeit des zyklischen Events, sowie durch die mittlere Temperatur und den mittleren SoC angegeben. Addiert wird dieser Anteil zum Anteil des rein zyklischen Events, womit dann die Stressfaktoren des „Gesamt-Events" ausgegeben werden können.

Die konkreten Stressfaktoren wurden zuvor über das Berechnen von Fitting-Funktionen der einzelnen Alterungskurven (Entwicklung von Kapazität bzw. Widerstand) aus (76) für die verschiedenen untersuchten DoD, C-Raten etc. ermittelt. Eine hinreichende Auflösung der Stressfaktoren (z. B. 1 °C bei der Temperatur, 1 % beim DoD etc.) wurde durch Interpolation sowie Extrapolation der ermittelten Stressfaktoren erreicht. Pro Event werden im Anschluss an die Berechnung der Stressfaktoren ($\Delta C$ bzw. $\Delta R_i$) die aktuelle Kapazität bzw. der aktuelle ohmsche Widerstands-




**A23:** Schema der Funktionsweise des verwendeten alterungsberücksichtigenden Gesamtmodells zur Prädiktion des Alterungsverhaltens von LIB in beliebigen Anwendungen basierend auf (70)

wert während der laufenden Simulation angepasst, damit u. a. das durch die Alterungsvorgänge veränderte elektrische Verhalten der Zelle weiterhin optimal beschrieben werden kann.

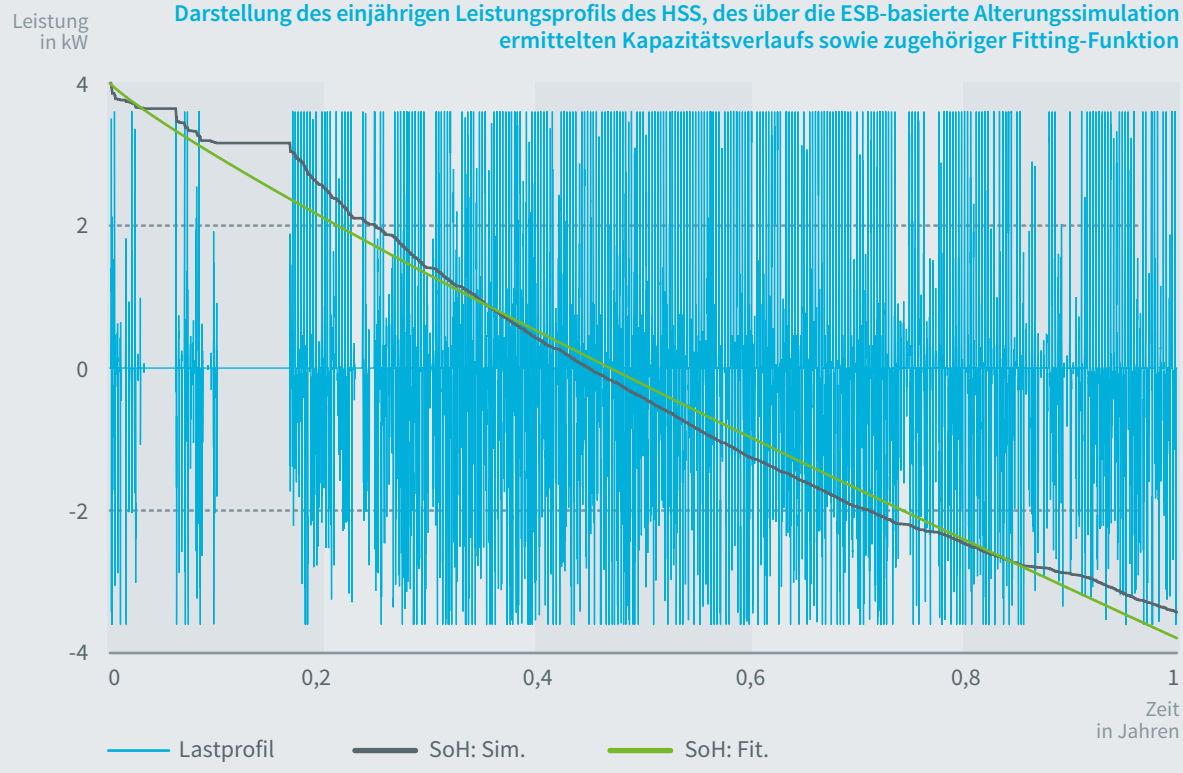
Aufgrund der hohen Rechenintensität des ESB-basierten Alterungsmodells und der daraus resultierenden langen Rechendauer wurde jeweils ein Jahr der ausgewählten SL-Anwendungen bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C simuliert. Die Auflösung des Lastprofils bei der PRL-Bereitstellung bzw. für den HSS betrug 1 s bzw. 5 min. Die berechneten Kapazitätsverläufe wurden im Anschluss gefittet, um über die erhaltenen Funktionen den Alterungsverlauf beider SL-Anwendungen für eine beliebige Betriebszeit mit geringem Rechenaufwand darstellen zu können.

Abbildung A24 zeigt das einjährige Leistungsprofil des HSS, den über die ESB-basierte Alterungssimulation ermittelten Kapazitätsverlauf sowie die zugehörige Fitting-Funktion. Im über die Alterungssimulation ermittelten Kapazitätsverlauf wird dabei insbesondere deren Event-basierte Funktionsweise deutlich: So zeigt sich z. B. während der beiden längeren inaktiven Phasen (bei einer Betriebszeit $t < 0{,}2$ a) keine Veränderung der Kapazität, allerdings erfolgt ein plötzlicher Abfall jeweils am Ende der beiden kalendarischen Events. Dies liegt daran, dass die zuvor erwähnten Stressfaktoren stets pro Event und nicht z. B. pro Zeitschritt ermittelt werden. Bei einem langandauernden Event erfolgt daher die in Abbildung A23 enthaltene Parameter-Aktualisierung dementsprechend spät, woraus der in Abbildung A24 ersichtliche treppenähnliche Verlauf hervorgeht. Nach der Berechnung der Kapazitätsverläufe für beide SL-Anwendungen (inkl. Batterieüberdimensionierung) wurden für diese mit der Matlab Curve-Fitting-Toolbox („Nonlinear Least Squares"-Methode, „Trust Region"-Algorithmus) Potenzfunktionen gemäß $C = 1 - \alpha \cdot t^{\beta}$ parametriert.

Für beide SL-Anwendungen wurde stets das Alterungsverhalten der zuvor beschriebenen Lastprofile bei originaler sowie „überdimensionierter“ Batterieauslegung simuliert. Bzgl. der Auslegung wurden die Fälle DoD = 100 %, 80 %, 40 % und 20 % betrachtet. Ein DoD = 100 % bedeutet im Folgenden das volle Ausschöpfen der **nutzbaren** Kapazität des simulierten Batteriespeichers, d. h. das Betreiben des Speichers in Originalgröße mit einem der beschriebenen Lastprofile. Für das HSS bedeutet daher z. B. ein DoD = 100 % das Betreiben eines 10 kWh Speichers zwischen SoC-Grenzen von 20 % und 90 %.

Eine Überdimensionierung des Speichers bei gleichbleibendem Lastprofil bewirkt hingegen, dass das Alterungsverhalten durch geringere C-Raten und DoD abgeschwächt wird. Erreichen SL-Batterien den E02L während des Betrachtungszeitraums der SL-Anwendungen, so müssen die Batteriespeicher unter erneut anfallenden Investitionen ersetzt werden. Unterdrückt eine gezielte Überdimensionierung der SL-Batterie einen solchen Wechsel, könnte der Ansatz trotz der erhöhten anfänglichen Investitionen

**A24:** Darstellung des einjährigen Leistungsprofils des HSS, des über die ESB-basierte Alterungssimulation ermittelten Kapazitätsverlaufs sowie zugehöriger Fitting-Funktion



ökonomisch sinnvoll sein (vgl. Kapitel 11). Dabei kann z. B. der Fall DoD = 20 % als fünffach größerer Speicher mit dementsprechend höheren Investitionen verstanden werden. Durch ein „Parallelschalten" der fünf fiktiven Speicher bei gleicher Last (vgl. mit dem Referenzfall DoD = 100 %) reduzieren sich dementsprechend DoD sowie C-Raten. Beim HSS wurde dabei der Start-SoC als konstant gewählt, d. h. auch bei dem Fall DoD = 20 % ist die untere SoC-Grenze = 20 %, aufgrund der Überdimensionierung ist die obere SoC-Grenze aber dementsprechend herabgesetzt. Bei der Bereitstellung von PRL weist der mittlere SoC sowohl bei originaler als auch bei überdimensionierter Speicherauslegung einen Wert von 50 % auf. Bei Überdimensionierung nähern sich daher beide SoC-Grenzen zunehmend dem mittleren SoC an. Neben einer Überdimensionierung der SL-Batterie ab Betriebsbeginn wäre prinzipiell auch ein Hinzufügen weiterer Batterieeinheiten während des Betrachtungszeitraumes denkbar, um den Kapazitätsverlust fortlaufend auszugleichen.

Tabelle T03 fasst schließlich die Parameter der ermittelten Alterungspotenzfunktionen gemäß $C = 1 - \alpha \cdot t^{\beta}$ für HSS sowie PRL-Bereitstellung in originaler sowie überdimensionierter Batterieauslegung zusammen. Im folgenden Unterkapitel werden die ermittelten Alterungsverläufe für beide SL-Anwendungen (und aller betrachteten Batterieauslegungen) für eine Betriebszeit von 30 Jahren vorgestellt und diskutiert. Bereits vorab sei erwähnt, dass bei der Berechnung sämtlicher Alterungsverläufe davon ausgegangen wurde, dass es sich um neue Batterien und keine SL-Batterien handelt. Da der Alterungsverlauf bei neuen Batterien zu Beginn geringfügig schneller vonstattengeht, wurden für die Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von SL-Batterien (und insbesondere dem Vergleich derer zu neuen Batterien) konstante Alterungsraten durch Linearisierung der Alterungsverläufe zwischen Betriebsjahr 20 und 30 berechnet.

| Anwendung | DoD | α | β |
|---|---|---|---|
| HSS | 100 % | 0,05843 | 0,88 |
| | 80 % | 0,04808 | 0,88 |
| | 40 % | 0,02792 | 0,88 |
| | 20 % | 0,01609 | 0,88 |
| PRL | 100 % | 0,03599 | 0,65 |
| | 80 % | 0,03115 | 0,65 |
| | 40 % | 0,02101 | 0,65 |
| | 20 % | 0,01683 | 0,65 |

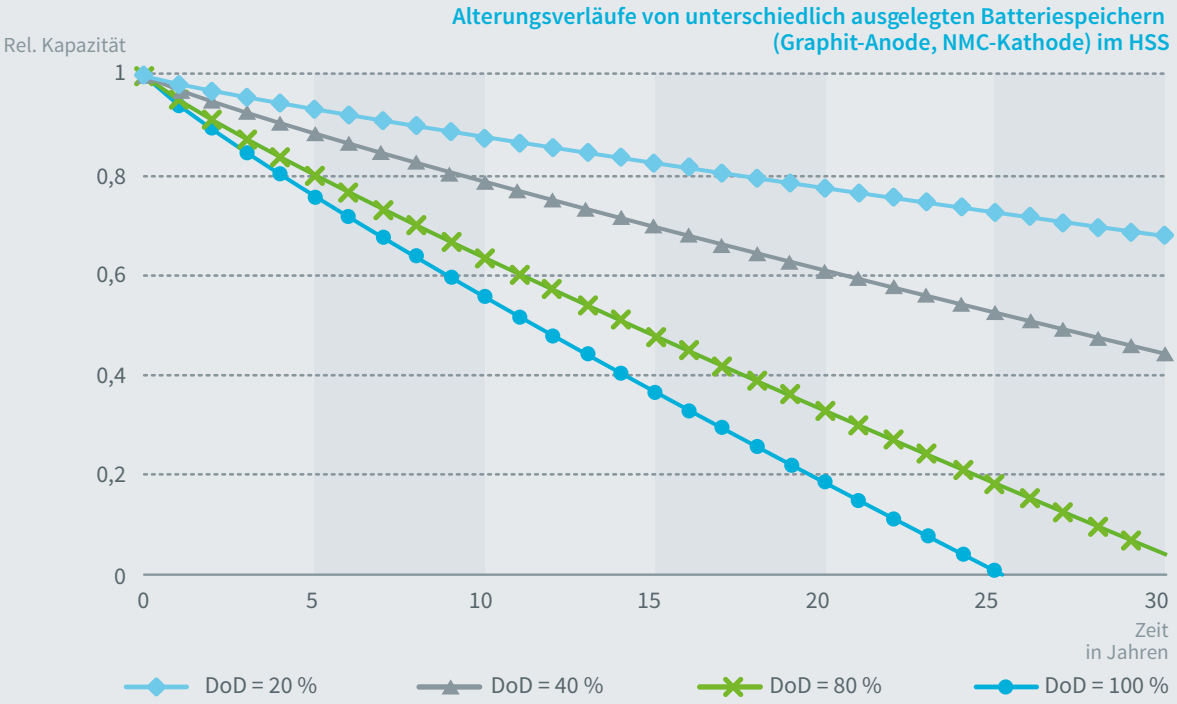
**T03:** Parameter der ermittelten Alterungsfunktionen $C = 1 - \alpha \cdot t^{\beta}$ für HSS sowie PRL-Bereitstellung in originaler sowie überdimensionierter Batterieauslegung

### 9.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung A25 zeigt die Alterungsverläufe unterschiedlich dimensionierter Batteriespeicher im HSS. Bereits auf den ersten Blick fällt der unerwartet starke Alterungsfortschritt auf. So wird bereits nach ca. 4 Jahren bei einem DoD = 100 % (bezogen auf die nutzbare Kapazität) eine Restkapazität von 80 % erreicht. Wird allerdings bedacht, dass innerhalb dieser 4 Jahre ca. 1000 Zyklen erreicht werden, so deckt sich der simulierte Kapazitätsverlust näherungsweise mit den in (76) gemessenen Werten des Alterungsexperiments auf Zellebene (für ähnliche DoD und C-Raten), dessen Alterungsdatensatz (Graphit-Anode, NMC-Kathode) auch zur Parametrierung des verwendeten Alterungsmodells herangezogen wurde. Es muss hierbei jedoch bedacht werden, dass NMC als Kathodenmaterial im stationären Bereich im „First Life“ unüblich ist, stattdessen i. d. R. Materialien mit einer höheren zyklischen Haltbarkeit wie z. B. LFP verwendet werden.

Bzgl. der Überdimensionierung fällt ein beinahe linearer Zusammenhang zum Alterungsverhalten auf: Bei einem DoD = 20 %, d. h. einer fünffachen Speichergröße verglichen mit DoD = 100 %, wird eine Restkapazität von 80 % anstatt nach 4 Jahren nach ca. 20 Jahren erreicht. Wird das EoL-Kriterium bei 80 % angesetzt, und soll das HSS über 20 Jahre eingesetzt werden, so müsste für den Fall DoD = 20 % näherungsweise gerade kein Batteriewechsel für den hier simulierten Batterietyp erfolgen. Ob sich allerdings die ebenfalls fünffach höheren Investitionen zu Beginn aus ökonomischer Sicht als sinnvoll erweisen, wird in der folgenden Wirtschaftlichkeitsbeurteilung untersucht.

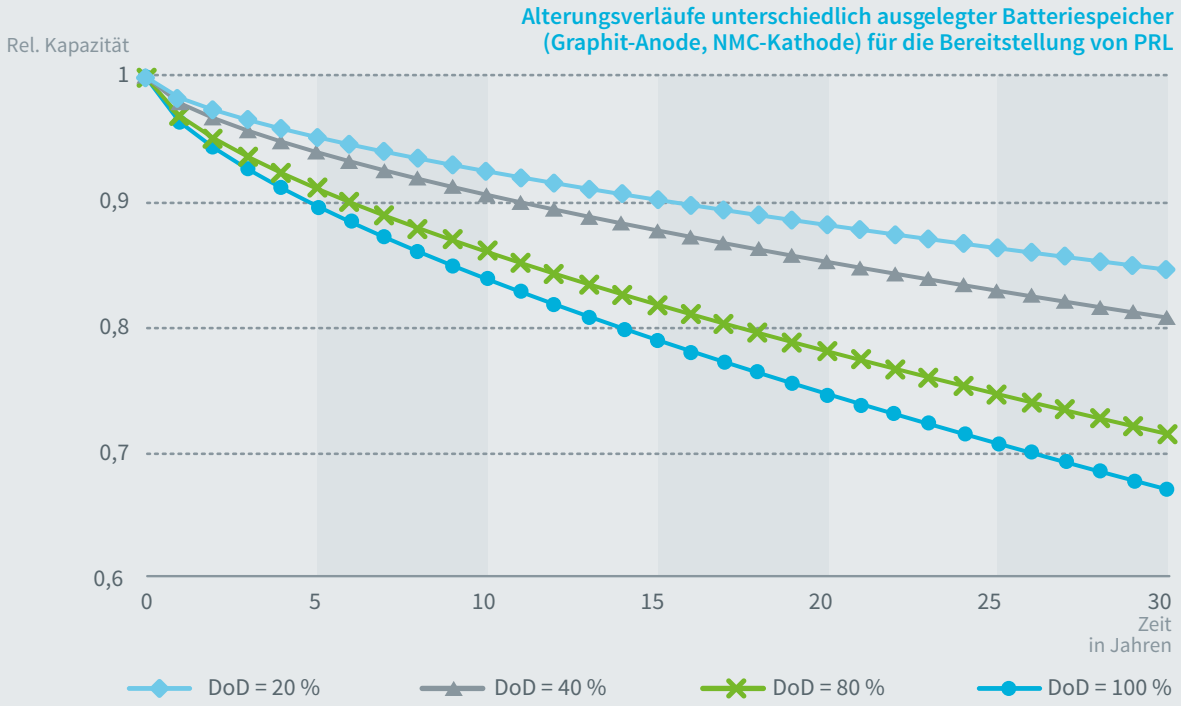
Wie bereits zuvor erwähnt, beschreiben die in Abbildung A25 dargestellten Kennlinien das Alterungsverhalten unterschiedlich ausgelegter neuer Batterien. Prinzipiell wird für LIZ von einer wurzelförmigen Abhängigkeit von der Zeit sowie einer näherungsweise linearen Abhängigkeit vom Ladungsdurchsatz ausgegangen (56) (63) (64) (70) (71). Daher kann es besonders bei Anwendungen, bei denen es zu einem hohen Anteil an kalendarischer Alterung kommt, zu einem anfänglich (während der ersten Zyklen) höheren Kapazitätsverlust als bei fortgeschrittener Betriebszeit kommen. Dies ist zudem bei abschließenden Formierungseffekten neuer Batterien möglich. Da bei der folgenden Wirtschaftlichkeitsbeurteilung insbesondere ein möglichst genauer Vergleich zwischen dem Verwenden von neuen Batterien und SL-Batterien angestellt werden soll, muss dieser Unterschied im Alterungsverhalten berücksichtigt werden. Für SL-Batterien wird daher eine konstante Alterungsrate ω aus den Alterungsverläufen aus Abbildung A25 (sowie Abbildung A26 für die Bereitstellung von PRL) durch Linearisierung zwischen den Betriebsjahren 20 und 30 abgeleitet. Die ermittelten Werte in %/a finden sich in Tabelle T03. Für das Alterungsverhalten neuer Batterien werden hingegen die ermittelten Alterungspotenzfunktionen verwendet.




**A25:** Alterungsverläufe von unterschiedlich ausgelegten Batteriespeichern (Graphit-Anode, NMC-Kathode) im HSS

Abbildung A26 zeigt die Alterungsverläufe unterschiedlich dimensionierter Batteriespeicher für die Bereitstellung von PRL. Verglichen mit den Verläufen im HSS fällt eine deutlich langsamer voranschreitende Kapazitätsabnahme auf. Zudem erscheint der Anteil der kalendarischen Alterung deutlich erhöht, welcher sich in Form eines anfänglich stärker voranschreitenden Alterungsfortschritts zeigt. Zwar häuft sich in der gleichen Betriebszeit eines Speichers im HSS vgl. mit der PRL-Bereitstellung bei letzterem eine deutlich höhere Anzahl an Zyklen an, doch sind diese (auch im hier als DoD = 100 % bezeichneten Fall) zu einem Großteil aufgrund der meist hochfrequenten sowie alternierenden Netzschwankungen äußerst flach. Lediglich bei größeren Abweichungen vom mittleren SoC = 50 %, mit folgendem Einkauf von Leistungspaketen am Intraday-Markt zum Ausgleich der Abweichungen, werden i. d. R. tiefere Halbzyklen erreicht.

Grundsätzlich nimmt die Alterung von LIZ mit abnehmendem DoD ab, siehe hierzu (76). Bei hochfrequenten Belastungen mit Wechselstrom wurden in (154) sogar Grenzfrequenzen (> 100 Hz) bestimmt, ab denen es zu keinem Ladungsdurchtritt mehr kommt und daher das resultierende Alterungsverhalten rein kalendarische Charakteristik aufweist. Aufgrund des hohen Anteils der kalendarischen Alterung im Alterungsverhalten eines Batteriespeichers bei der PRL-Bereitstellung besitzt die Überdimensionierung einen erheblich geringeren Einfluss als es beim HSS-Speicher (aufgrund des hohen Anteils an zyklischer Alterung) der Fall ist. Dies zeigt sich in Abbildung A26 z. B. dadurch, dass bei einem DoD = 100 % (bezogen auf die nutzbare Kapazität) eine Restkapazität von 90 % nach ca. 5 Jahren erreicht wird, bei einem DoD = 20 % (fünffache Überdimensionierung) aber nicht, wie zu vermuten, nach 25 Jahren, sondern bereits nach 15 Jahren. Die kalendarische Alterung verläuft unabhängig von der




Dimensionierung des Speichers, nur der Anteil rein zyklischer Alterung kann durch Überdimensionierung unterdrückt werden. Die konstanten Alterungsraten ω (ermittelt durch Linearisierung zwischen Betriebsjahr 20 und 30) finden sich in Tabelle T04.

**A26:** Alterungsverläufe unterschiedlich ausgelegter Batteriespeicher (Graphit-Anode, NMC-Kathode) für die Bereitstellung von PRL

| Anwendung | DoD | ω / (%/a) |
|---|---|---|
| HSS | 100 % | 3,51 |
| | 80 % | 2,89 |
| | 40 % | 1,68 |
| | 20 % | 0,97 |
| PRL | 100 % | 0,77 |
| | 80 % | 0,67 |
| | 40 % | 0,45 |
| | 20 % | 0,36 |

**T04:** Konstante Alterungsraten **ω** für das Alterungsverhalten von SL-Batterien

# 10 Maximaler theoretischer Restwert

In diesem Kapitel werden die Methodik zur Berechnung eines maximalen theoretischen Restwerts gebrauchter LITB und dessen Bedeutung aus Sicht des Fahrzeugherstellers sowie SL-Anwendungsbetreibers erläutert. Dabei wird angenommen, dass für verfügbare SL-Batterien stets Nachfrage besteht und deren Wettbewerber neue Batterien in der jeweiligen Anwendung sind. Zudem wird die Bedeutung des maximalen theoretischen Restwerts in Relation zum Recycling sowie SL-Konzeptalternativen (Reparieren defekter LITB, Konkurrenztechnologie Pb-Batterien) diskutiert.

## 10.1 Ansatz

Der direkte Konkurrent von zu einem bestimmten Zeitpunkt verfügbaren SL-Batterien sind stets neue Batterien des zeitgleich bestehenden Technologiestands. Letztere sind daher i. d. R. technisch überlegen, aber auch teurer. Ein potenzieller SL-Anwendungsbetreiber wird daher die Kosten eines aus neuen bzw. SL-Batteriemodulen aufgebauten Speichers vergleichen, und bei letzterem abwägen, ob die vermiedenen Ausgaben bzw. Ersparnisse groß genug sind, um das Risiko bzgl. eines gebrauchten Produkts mit ungewissem Alterungsverhalten einzugehen. Die maximale theoretische Kostengrenze einer wiederaufbereiteten SL-Batterie beschreibt daher den Preis, den der SL-Anwendungsbetreiber allerhöchstens zahlen wird. Wird diese Grenze überschritten, wird sich der SL-Interessent gegen die Investition in SL-Batterien entscheiden und neue Batterien in seinem geplanten Speicher einsetzen. Aus Sicht des Fahrzeugherstellers muss von dieser maximalen theoretischen Kostengrenze der Kostenaufwand für die Wiederaufbereitung ausgedienter LITB hin zu SL-Batterien abgezogen werden, um den durch ein SL-Konzept erzielbaren Erlös zu quantifizieren. Der maximale theoretische Restwert $K_{Rest,max}$ von ausgedienten LITB, welcher dem TCO-Reduktionspotenzial von BEV durch SL-Konzepte entspricht, kann formell wie folgt ausgedrückt werden (12) (18) (11):

$$K_{Rest,\,max} = \xi_{UsedProduct} \cdot \zeta_{Health} \cdot K_{Neu} - K_{Auf}$$

Hierbei drückt der „Second Hand“-Vorfaktor $\xi_{UsedProduct}$ eine Wertminderung aus, die psychologisch betrachtet als eine Art Misstrauen gegenüber bereits gebrauchten Produkten aufgefasst werden kann. Ein praktisches Beispiel hierfür ist z. B. der überproportionale Wertverfall eines herkömmlichen Neuwagens im ersten Gebrauchsjahr. Für die anstehenden Berechnungen wird $\xi_{UsedProduct}$ gemäß (11) und (153) mit konstant 50 % bzw. 75 % bis einschließlich 2015 bzw. ab 2030 angesetzt, die Zwischenjahre werden linear interpoliert. Eine relative Steigerung von $\xi_{UsedProduct}$ ist prinzipiell durch die Vermarktung von SL-Batterien als „grünes Produkt“ möglich.

Der Gesundheitsfaktor $\zeta_{Health}$ drückt den SoH der Batterieeinheit gewichtet auf das festgelegte E02L-Kriterium aus und berechnet sich wie folgt (11):

$$\zeta_{Health} = (SOH - E02L) / (1 - E02L)$$

Da i. d. R. bei festgelegtem E02L beurteilt werden soll, wann der optimale Übergabezeitpunkt der Batterie aus dem Fahrzeug in die SL-Anwendung in Abhängigkeit des SoH vorliegt, kann in dem formellen Zusammenhang von $\zeta_{Health}$ der SoH als E01L aufgefasst und deckungsgleich verwendet werden. Für diesen werden in den anstehenden Berechnungen die auf Garantieangaben beruhenden Alterungsverläufe aus Abbildung A22 herangezogen. Bzgl. des LITB-Neupreises $K_{Neu}$ werden die in Abbildung A05 gezeigten Entwicklungen und Vorhersagen zu Grunde gelegt.

Für die Wiederaufbereitungskosten $K_{Auf}$ finden sich in der Fachliteratur ungefähre Richtwerte zwischen 150 $/kWh und 15 $/kWh (ca. 110 €/kWh und 11 €/kWh nach dem in Kapitel 6.2 verwendeten Wechselkurs) (6) (12) (18) (20). Da der Fahrzeughersteller die für das Recycling anfallenden Kosten durch die Weiterverwendung i. d. R. nur zeitlich nach hinten verschieben kann, diese aber zu einem späteren Zeitpunkt trotzdem zu begleichen sind, wird dieser nur an einem SL-Konzept interessiert sein, sofern $K_{Rest,max} > 0$. Sollten die Kosten für das Recyceln gealterter LITB jedoch in der Zukunft abnehmen, so könnte diese Grenze um die Differenz von den aktuellen zu den künftigen Recycling-Kosten $\Delta K_{Recycling}$ herabgesetzt werden. In diesem Fall könnte der Fahrzeughersteller auch von einem SL-Konzept profitieren, falls $K_{Rest,max} > - \Delta K_{Recycling}$. Nehmen die Recycling-Kosten hingegen nicht ab, sondern bleiben wider Erwarten konstant, profitiert der Fahrzeughersteller durch die später anfallenden Kosten von der Diskontierung.

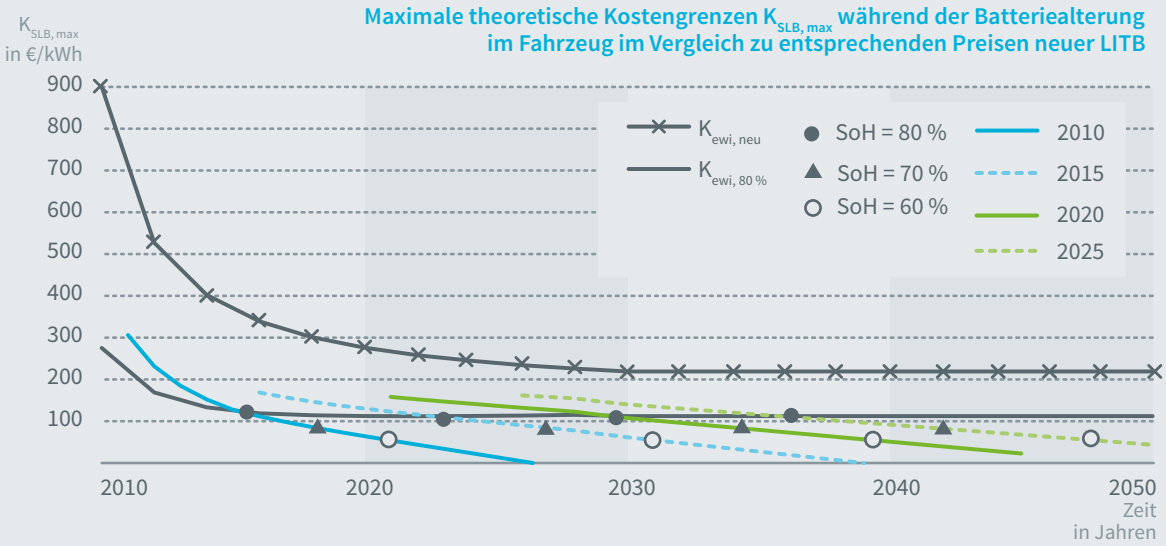
Gemäß der Methodik darf die Kostengrenze von SL-Batterien gemäß $K_{SLB,max} = K_{Rest,max} + K_{Auf}$ nicht überschritten werden, da sich der potenzielle Interessent ansonsten nach (11) (12) (18) für neue Batterien entscheiden wird. Wird diese Bedingung erfüllt, so wird der Interessent SL-Batterien neuen LIB vorziehen. Sollten die Kosten $K_{SLB,max}$ zudem unter den Preisen von Konkurrenztechnologien (wie z. B. Pb-Batterien) liegen und grundsätzlich ein solcher Speicher in der angestrebten Anwendung wirtschaftlich zu betreiben sein, so kann die maximale theoretische Kostengrenze $K_{SLB,max}$ auch in der Praxis angesetzt werden. Die Wirtschaftlichkeitsbeurteilung eines Batteriespeichers als HSS sowie zur Bereitstellung von PRL wird im Anschluss in Kapitel 11 vorgestellt.

## 10.2 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung A27 zeigt die maximalen theoretischen Kostengrenzen von SL-Batterien basierend auf den zuvor vorgestellten LITB-Neupreisen des ewi aus (40). Es sind die Entwicklungen der $K_{SLB,max}$ für LITB aus BEV mit Baujahr 2010, 2015, 2020 und 2025 dargestellt. Dabei wird angenommen, dass das Baujahr der Fahrzeuge dem der verbauten LIZ entspricht. Neben dem Preisverfall der LITB durch eine Reduktion von $K_{Neu}$ kommt es (bei gleichzeitiger Zunahme von $\xi_{UsedProduct}$) zudem zu einem Wertverlust aufgrund von Batteriealterung. Die hinterlegten Alterungsverläufe (basierend auf dem Garantieansatz) wurden in Abbildung A22 vorgestellt. Werden die SoH-Angaben (80 %, 70 %, 60 %) der „Batteriejahrgänge“ während der Betriebszeit in den BEV verglichen, so zeigt sich der integrierte LIB-Technologiefortschritt durch zunehmenden Abstand aufgrund abnehmender Alterungsgeschwindigkeit bei zukünftigen Batterien.

Werden die $K_{SLB,max}$ der verschiedenen BEV bei den eingezeichneten SoH-Werten betrachtet, so fällt auf, dass diese unabhängig vom Baujahr des BEV sowie vom vorliegenden Jahr relativ stabil sind. Bei einem SoH = 80 % bzw. 70 % liegt $K_{SLB,max}$ jeweils leicht über bzw. unter 100 €/kWh. Bei einem SoH = 60 % beträgt $K_{SLB,max}$ nur noch um die 50 €/kWh. Da für neue LITB ab 2030 ein stabiler Wert von 219 €/kWh (Annahme) vorliegt, kann näherungsweise postuliert werden, dass sich der Preis von SL-Batterien bei einem E01L = 80 % bei 50 % des zu diesem Zeitpunkt vorliegenden LITB-Neupreises einpendeln wird. Dieser einprägsame Zusammenhang, d. h. $K_{SLB,max} = 50\ \% \cdot K_{Neu}$, wird in anstehenden Berechnungen stets angenommen, auch wenn der aktuelle ökonomische Vorteil von SL-Batterien gegenüber neuen Batterien sogar größer ausfällt. Die Annahme erscheint aber dennoch gerechtfertigt, da erst in den kommenden Jahren mit einer größeren Verfügbarkeit von SL-Batterien zu rechnen ist.

Für die Berechnung von $K_{ewi,80\%}$ wurde in die Formel von $\zeta_{Health} = (SoH - E02L) / (1 - E02L)$ neben E02L = 40 % auch ein konstanter SoH = E01L = 80 % angesetzt, wodurch $\zeta_{Health}$ konstante 67 % beträgt. Dieser Wert wurde alsdann mit dem bekannten Verlauf von $\xi_{UsedProduct}$ und $K_{Neu}$ multipliziert und bewirkt in Abbildung A27 eine Interpolation von $K_{SLB,max}$ für LITB aus nicht abgebildeten Baujahren bei einem SoH = 80 %. Der Verlauf von $K_{ewi,80\%}$ unterstreicht ab 2015 den konstanten Wert von $K_{SLB,max} \approx 100$ €/kWh und die fortan verwendete Annahme $K_{SLB,max} = 50\ \% \cdot K_{Neu}$. Wird bedacht, dass $K_{Rest,max} = K_{SLB,max} - K_{Auf} > 0$ gelten muss, so fällt auf, dass dies ggf. bei einem $K_{Auf}$ zwischen 110 €/kWh und 11 €/kWh nicht garantiert werden kann. Bleibt $K_{Auf}$ hoch, so kann $K_{Rest,max}$ (geringfügig) negativ werden, und der Fahrzeughersteller würde demnach das Verlustgeschäft nicht durchführen. Für den Fall, dass $K_{Auf}$ niedrige Werte annimmt, könnten in dem hier diskutierten Szenario maximale theoretische Restwerte $K_{Rest,max}$ von bis



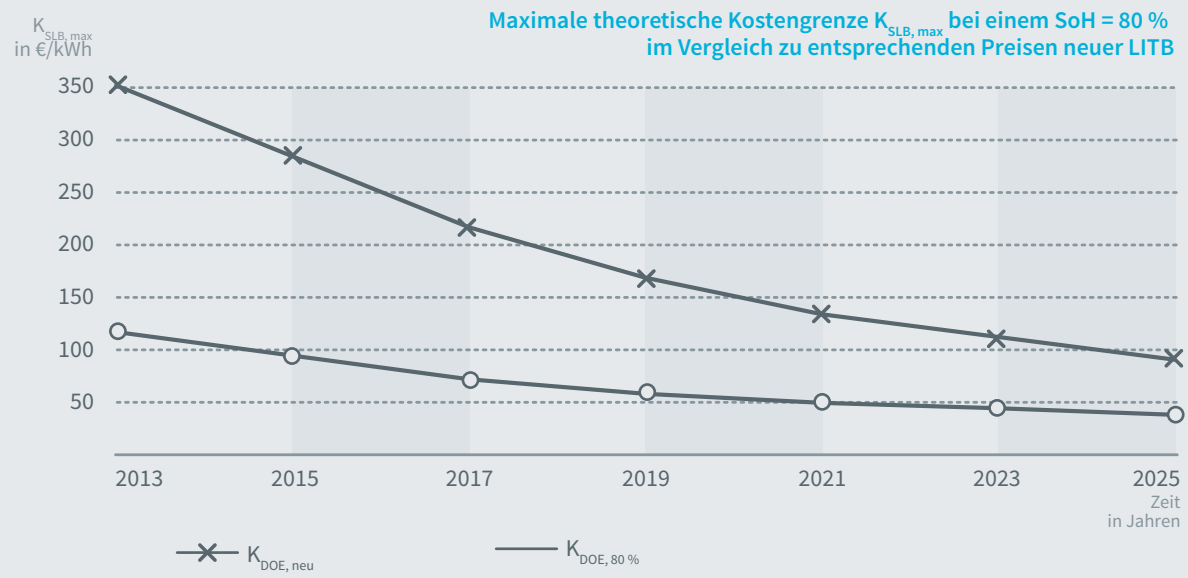

**A27:** Maximale theoretische Kostengrenzen $K_{SLB, max}$ während der Batteriealterung im Fahrzeug im Vergleich zu entsprechenden Preisen neuer LITB (Datengrundlage nach ewi (40))

zu 90 €/kWh erzielt werden. Dieser durch Weiterverwendung ausgedienter LITB generierte Wert entspricht dem TCO-Reduktionspotential von BEV. Die Auswirkungen von SL-Anwendungen auf die TCO von BEV wird in Kapitel 11.5 eingehend diskutiert.

Bei dem eben beschriebenen Beispiel muss allerdings bedacht werden, dass die Verläufe auf der LITB-Kostenvorhersage des ewi beruhen (40). Deren Werte stellen die konservativste Entwicklung bzw. Vorhersage aus (36) dar, was sich positiv auf den Restwert gealterter LITB auswirkt. Wird hingegen die Studie mit dem stärksten prädizierten Preisverfall neuer LITB herangezogen, d. h. die Werte des DOE, so zeigt $K_{DOE,80\%}$ in Abbildung A28, dass die maximale theoretische Kostengrenze von SL-Batterien (für E01L = 80 %) bereits 2015 einen Wert leicht unter 100 €/kWh aufweist und dieser bis 2025 auf unter 50 €/kWh absinkt. Die Wiederaufbereitung ausgedienter LITB müsste daher hocheffizient und kostengünstig umsetzbar werden, damit bei dieser niedrigen Kostengrenze von $K_{SLB,max}$ noch positive $K_{Rest,max}$ erzielt werden können. Wie bereits erwähnt kann der Aufwand für die Wiederaufbereitung z. B. durch effiziente Alterungsschnelltests oder eine Minimierung des logistischen Aufwands reduziert werden. Letzteres bedeutet insbesondere, dass der Fahrzeughersteller selbst ausgediente LITB aufbereitet und als SL-Anwendungsbetreiber agiert (um z. B. Transportvorgänge zu vermeiden).

Die vorgestellten Ergebnisse lassen vermuten, dass durch SL-Konzepte ein gewisses TCO-Reduktionspotential generiert werden kann. Dieses ist insbesondere vom Aufwand der Wiederaufbereitung gealterter LITB in der Zukunft abhängig. Übersteigt dieser Aufwand jedoch die maximale Kostengrenze von SL-Batterien, so wird sich ein Fahrzeughersteller stets gegen die Investition in eine SL-Anwendung entscheiden, sofern kein zusätzlicher Vorteil durch die später anfallenden (und vermutlich geringeren) Recycling-Kosten besteht. Als weiterer zusätzlicher Vorteil sind Subventionen zu nennen.

In den folgenden Unterkapiteln werden die ermittelten, theoretisch erzielbaren Preise von SL-Batterien derer von Pb-Batterien gegenübergestellt.




**A28:** Maximale theoretische Kostengrenze $K_{SLB, max}$ bei einem SoH = 80 % im Vergleich zu entsprechenden Preisen neuer LITB (Datengrundlage DOE)

Zudem soll eine Alternative zum SL-Konzept, das Reparieren defekter LITB, diskutiert werden. Abschließend wird auf die Bedeutung des Recyclings in Relation zu den Restwerten von SL-Batterien (z. B. in Abhängigkeit von Besitzverhältnissen etc.) eingegangen.

## 10.3 Bleisäurebatterien

In vielen für SL-Batterien potenziell geeigneten Anwendungen (z. B. Fahrzeug-Starterbatterien, Back-Up-Speicher für Telekommunikationssysteme, Notstromsysteme, Traktionsbatterien für Flurförderzeuge, etc.) stellen Pb-Batterien die derzeit am häufigsten eingesetzte Technologie dar (11) (12) (18). Zwar weisen LIB technologische Vorteile (z. B. besseres Alterungsverhalten) gegenüber Pb-Batterien auf, eine umfassende Marktverdrängung (trotz abnehmendem Anteil von Pb-Batterien z. B. in HSS (155)) letzterer in solchen Anwendungen scheitert aber derzeit noch aufgrund eines zu hohen LIB-Systempreises.

In einer 2013 veröffentlichten Literaturzusammenstellung verglich die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich preisliche sowie technische Angaben von Pb-Batterien und LIB (156): Bei der kalendarischen Haltbarkeit wurden dabei für Pb-Batterien bzw. LIB im Schnitt 8,5 bzw. 11,5 Jahre ermittelt. Besonders bei einer mittleren erreichbaren Zyklenzahl (für DoD = 80 %) von 1250 bei Pb-Batterien bzw. 10250 bei LIB sticht der erhebliche Vorteil der neueren Batterietechnologie hervor. Zudem wird für LIB ein mittlerer Gesamtwirkungsgrad von 90 % vgl. mit 82 % bei Pb-Batterien angegeben. Den technologischen Vorteilen von LIB steht allerdings ein erheblich höherer Batteriesystempreis von 844 €/kWh vgl. mit 171 €/kWh bei Pb-Batterien gegenüber. Besonders bei den preislichen Angaben muss aber bedacht werden, dass diese mittlerweile nicht mehr aktuell sind. So sind LIB-Systempreise mittlerweile auf Werte zwischen 300 €/kWh und 400 €/kWh abgesunken (siehe (36)), und Pb-Batteriesystempreise sind aktuell für ca. 100 €/kWh bis 150 €/kWh verfügbar (18).

Trotz eines starken Preisrückgangs von LIB-Systemen, besteht weiterhin eine hohe Nachfrage an Pb-Systemen. Daher besteht für SL-Batterien aufgrund deren erheblich niedrigeren Preises (vgl. mit neuen LIB) die Chance, als Alternative zu herkömmlichen Pb-Batterien auf einen bereits bestehenden, riesigen Markt zu treffen. Es darf insbesondere davon ausgegangen werden, dass die Nachfrage dieses etablierten Marktes nach günstigen Energiespeichern deutlich größer ist als das Angebot an SL-Batterien in den kommenden Jahren. Werden die Pb-Batteriesystempreise von ca. 100 €/kWh bis 150 €/kWh mit der maximalen theoretischen Kostengrenze für SL-Batterien (basierend auf Daten des ewi der Universität Köln, E01L = 80 %) $K_{ewi,80\%} \approx 100$ €/kWh in Abbildung A27 verglichen, so liegt die Grenze gleichauf oder tendenziell sogar leicht unter den Pb-Preisen. Trotz der Voralterung von SL-Batterien kann zusätzlich zu diesem preislichen Vorteil auch von einem besseren Alterungsverhalten, bzw. längeren erzielbaren Betriebszeiten, ausgegangen werden. Neben geringeren Anschaffungskosten sowie technischen Vorteilen bei der Verwendung von SL-Batterien verglichen mit Pb-Batterien muss bedacht werden, dass erstere ohnehin vorhanden sind und ansonsten unter hohem Energieaufwand recycelt werden müssen. Durch die vorübergehende Verzögerung des Recycelns gealterter LITB, aber v. a. durch das Vermeiden einer Neuproduktion von Pb-Batterien, entsteht demnach ggf. auch ein ökologischer Vorteil.

Fazit des Preisvergleichs von Pb-Batterien mit der maximalen theoretischen Kostengrenze von SL-Batterien $K_{SLB,max}$ ist daher: Die Grenze muss aufgrund der tendenziell höheren Preise von Pb-Batterien bei gleichzeitig vorhandener technischer sowie ökologischer Vorteile von SL-Konzepten durch die Konkurrenztechnologie nicht herabgesetzt werden.

Abschließend soll auf ein weiteres Anwendungsfeld hingewiesen werden, indem derzeit Pb-Batterien, aber auch Dieselaggregate dominieren: Der Elektrifizierung ländlicher dezentraler Gebiete in Entwicklungsländern durch ein Verwenden von SL-Batterien in Micro- oder Mini-Grid-Systemen. In (10) wird hierbei auf eine durchschnittliche Haltbarkeit von drei bis fünf Jahren für einen Pb-Batteriespeicher bzw. sechs bis acht Jahren für einen SL-Batteriespeicher hingewiesen. Die folglich höhere Anzahl an Batteriewechseln für Pb-Batterien kann durch hohe Umgebungstemperaturen (z. B. Zentralafrika oder Südostasien) weiter steigen, da Pb-Batterien sensibler auf hohe Temperaturen reagieren als LIB. Sollte z. B. bei Pb-Batterien, deren Wasserfüllstand gewartet werden muss (zur Sicherstellung eines ausreichenden Wasserfüllstands bzw. angemessenen Säuregrads im Elektrolyten), destilliertes Wasser nicht oder nur unzureichend verfügbar sein, so verringert sich die erzielbare Haltbarkeitszeit zusätzlich. Aufgrund der ca. doppelt so hohen gravimetrischen Energiedichte von SL-Batterien vgl. mit neuen Pb-Batterien (70 Wh/kg – 100 Wh/kg bei SoH 70 %), oder beinahe dreifach höheren volumetri-

schen Energiedichten (175 Wh/l – 280 Wh/l bei SoH = 70 %), entstehen zudem ökonomische Vorteile beim (z. B. Frachtschiff-) Transport der Batterien in die Entwicklungsländer (10).

## 10.4 Reparieren defekter Traktionsbatterien

Nachdem zuvor dargestellt wurde, dass SL-Batterien eine ökonomisch sowie ökologisch sinnvolle Alternative zu herkömmlichen Pb-Batterien darstellen können, und letztere keine Reduktion der maximalen theoretischen Kostengrenze $K_{SLB,max}$ erforderlich machen, wird nun auf eine weitere Alternative bzw. Konkurrenz von SL-Konzepten eingegangen. Anstatt einer Weiterverwendung gealterter LITB in einer SL-Anwendung kann alternativ versucht werden, defekte Traktionsbatterien zu reparieren und diese in ihrer ursprünglichen Anwendung weiter zu betreiben. Oftmals wird der E01L einer LITB durch schwächere Batteriemodule vorzeitig erreicht, die übrigen Module könnten aber noch ohne weiteres im Fahrzeugbetrieb verbleiben (91). Alternativ zur Detektion der in SL-Konzepten weiterverwendbaren Batterieeinheiten könnten demnach die schwachen Einheiten identifiziert und ausgetauscht werden, um den Einsatz der LITB weiter zu ermöglichen. Hierbei muss bedacht werden, dass neue oder bereits gebrauchte Ersatzmodule für das jeweilige BEV vorhanden sein müssen (22).

Wird bei der Identifikation auszutauschender Batterieeinheiten festgestellt, dass eine Reparatur sich aufgrund zu vieler schadhafter Einheiten nicht mehr lohnt, so könnten die besseren zumindest für die Weiterverwendung in einem anderen Fahrzeug gelagert werden. Hierbei muss überprüft werden, ob die Lagerungskosten gerechtfertigt sind oder es aus ökonomischer Sicht vorzuziehen ist, neue Batterieeinheiten in ein BEV mit erforderlichem Austausch einzusetzen. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Austausch defekter Einheiten grundsätzlich nur auf Modulebene aber nicht auf Zellebene erfolgen wird, da letzterer ökonomisch nicht umsetzbar ist. So ist z. B. das Lösen von Schweißpunkten oder Lötstellen zwischen einzelnen LIZ mit erheblichem Aufwand und daher auch Kosten verbunden. Die bei der Identifikation auszutauschender Batterieeinheiten anfallenden Kosten könnten (wie auch bei der Bestimmung für SL-Konzepte tauglicher Einheiten) durch Alterungsschnelltests oder idealerweise durch Online-Zustandsdiagnostik minimiert werden (vgl. Kapitel 7).

Dieser in der Literatur bisher eher unbeachtete Ansatz erscheint v. a. in der aktuellen Übergangsphase interessant, in der nur wenige gealterte LITB vorhanden sind. Je nach Verfügbarkeit in der Zukunft kann ein Reparieren von wegen einzelnen Batterieeinheiten schwachen LITB mit genutzten aber noch für den Fahrzeugbetrieb tauglichen Einheiten sinnvoll erscheinen. Ein

solcher Ansatz sollte allerdings stets als Ergänzung und nicht als Alternative zu SL-Konzepten betrachtet werden. Daher wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass ein solches Reparaturkonzept von LITB vorerst keine Auswirkungen auf den erzielbaren Preis von SL-Batterien haben wird.

## 10.5 Recycling

Das Batterierecycling stellt bislang das Standardverfahren für die Weiterverwertung von defekten oder nicht mehr verwendbaren LITB dar. Dabei werden die grundsätzlich in Batterien enthaltenen Elemente, wie z. B. Nickel, Kobalt und Lithium, durch mechanische und chemische Prozesse größtenteils zurückgewonnen. Im Hinblick auf SL-Batterien und deren Anwendungen spielen Kosten und Effizienz von Recyclingprozessen eine wichtige Rolle, da diese den Wert einer SL-Batterie stark beeinflussen können.

Nach § 5 BattG sind die Hersteller zur unentgeltlichen Rücknahme und Verwertung bzw. Beseitigung von Altbatterien verpflichtet. Jedoch können für Industrie-Altbatterien, zu denen auch die Batterien aus EV gehören, nach § 8 Abs. 2 BattG „abweichende Vereinbarungen“ getroffen werden. (157)

Derzeit ist das Recycling von LITB aufgrund energieintensiver Teilprozesse trotz wertvoller in den Batterien enthaltener Rohstoffe nicht ökonomisch umsetzbar. Die Kosten für das Recycling von Batterien setzen sich unter anderem aus den Kosten für die Sammlung, die Demontage, die Logistik und die Aufbereitung zusammen. Die Erlöse sind abhängig von der Zusammensetzung, dem Zustand der Zellen, dem Altbatterieaufkommen und insbesondere von den volatilen Preisen der Wertstoffe Kobalt und Nickel (158) (159). Reale Kostendaten zu konkreten Beispielen stehen nicht zur Verfügung und fanden daher keinen Eingang in diese Studie. Ca. 4 € pro Kilogramm Batterie müssen aktuell laut dafür (160), (161) aufgebracht werden. GRS-Batterien – das größte Batterierücknahmesystem in Europa verlangen derzeit für 2–4 kg schwere Lithium-Ionen Sekundärbatterien 0,34 €/kg, was bei einer 200 kg schweren Batterie 68 € oder bei einer Energiedichte von 100 Wh/kg spezifischen Kosten von 3,4 €/kWh entspricht. Hierbei ist der Transport jedoch nicht mit berücksichtigt (162). Nach (159) ist bei einer im Jahr 2015 einem pyrometallurgischem Recyclingprozess zugeführten 220 kg schweren NMC-Zelle mit Gesamtkosten von rund 459 € zu rechnen.

Effizientere Prozesse versprechen aber eine profitable Umsetzung in naher Zukunft (163). In einem zukünftigen Referenzszenario nach (158) liegt die Gewinnschwelle von NMC-Systemen bei etwa 4100 t Systeme/a. So ließe sich bei 15000 t Systeme/a ein Gewinn von 767 €/t Systeme erzielen. Zeit-

lich würde diese Gewinnschwelle in einem „realistischen“ Szenario, mit der Annahme von einem Altbatterieaufkommen im Jahr 2015 von 60 t, im Jahr 2020 von 1000 t und im Jahr 2030 von 29000 t, ungefähr in den Jahren 2024 bis 2026 liegen, wobei die Abgrenzung dieses Bereichs mit großen Unsicherheiten behaftet ist (158).

Aufgrund von § 8 Abs. 2 BattG können nach der Erstanwendung zwischen dem Hersteller und dem SL-Batterie-Anbieter bzgl. der Recyclingkostenübernahme individuelle Vereinbarungen getroffen werden. Entscheidend für diese Vereinbarungen ist die Dauer, in der die Batterien in der SL-Anwendung verbleiben, da wie in obigen Szenario nach (158) beschrieben, von sinkenden Recyclingkosten bzw. sogar von Gewinnen ausgegangen werden kann.

So ist es möglich, in gegenseitigem Einverständnis die Verpflichtung zum Recycling mit dem Verkauf der Batterien an den SL-Batterieanbieter abzugeben. Ist mit Kosten für das Recycling nach der SL-Anwendung zu rechnen, entstehen im ersten Moment Kosteneinsparungen für den Hersteller. Jedoch wirkt sich dies auch wertmindernd auf den Verkaufspreis der SL-Batterie aus. Der Grenzfall wäre eine kostenlose Abgabe der SL-Batterie bis hin zu Zahlungen vom Hersteller an den SL-Batterieanbieter. Ist mit Gewinnen für das Recycling nach der SL-Anwendung zu rechnen, so entgehen dem Hersteller im ersten Moment Erlöse. Da sich dies wertsteigernd auf die SL-Batterie auswirkt, kann in diesem Fall jedoch auch von einem höheren Verkaufspreis ausgegangen werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Recyclingverpflichtung beim Hersteller zu belassen, die SL-Batterie müssten dann nach dem Einsatz an den Hersteller zurückgegeben werden. Da laut (158) von sinkenden Recyclingkosten bzw. sogar von Gewinnen ausgegangen werden kann, ergeben sich für den Hersteller im Vergleich zu einem direkten Recycling nach der Erstanwendung finanzielle Einsparungen bzw. sogar ggf. Erlöse, welche umso größer ausfallen, je länger die Batterien in der SL-Anwendung verbleiben. Des Weiteren ist der Hersteller beim Verkauf eines BEV verpflichtet, Rückstellungen in Höhe der abgezinsten, zu erwarteten Entsorgungskosten zu bilden (Art. 53 Abs. 1 HGBEG i. V. m. §§ 3 bis 5 der AltfahrzeugV) (164) (165). Bei einer längeren Nutzung der Batterien würde dies durch die Abzinsung über einen längeren Zeitraum auch zu Kostensenkungen führen. Ist in diesem Fall, bei der Beibehaltung der Recyclingverpflichtung beim Hersteller, mit Kosten für das Recycling nach der SL-Anwendung zu rechnen, so ergeben sich potenzielle Einsparungen für den SL-Batterie-Anbieter, was sich wertsteigernd auf die SL-Batterie auswirken kann und somit zu einem höheren Verkaufspreis führen würde. Ist von Erlösen nach der SL-Anwendung für das Recycling auszugehen, so entgehen dem SL-Batterieanbieter potenzielle Gewinne, was sich wertmindernd auf den Kaufpreis auswirken kann.

# 11 Wirtschaftlichkeitsbewertung

In diesem Kapitel wird die Wirtschaftlichkeit von Neubatterien und SL-Batterien für die beiden ausgewählten SL-Anwendungen (PRL und HSS) abgeschätzt und vergleichend gegenübergestellt. Dabei werden die Beschreibungen der SL-Anwendungen aus Kapitel 8 sowie die Ergebnisse hinsichtlich Alterungsverhalten und Restwert aus Kapitel 9 und 10 zusammengeführt. Anschließend werden die Auswirkungen von SL-Konzepten auf die TCO von BEV diskutiert. Wie in Kapitel 7 beschrieben, wird im Folgenden als E01L-Kriterium 80 % und als E02L-Kriterium 40 % angesetzt. Als fiktiver Zeitraum wurde 2015 bis 2035 gewählt, da hier die Datengrundlage am besten ist. Die Grundlagen der Kapitalwertmethode werden im Folgenden kurz beschrieben. Grundsätzlich steht in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Anwendungen im Fokus, sondern der wirtschaftliche Mehrwert durch Einsatz von SL-Batterien gegenüber neuen Batterien. Vor diesem Hintergrund werden anwendungsspezifische Subventionen und Förderungen, wie die KfW-Förderung (166) von HSS, nicht in der Berechnung berücksichtigt.

## 11.1 Grundlagen: Kapitalwertmethode und Rentabilität

Zu verschiedenen Zeitpunkten anfallende Kosten und Erlöse müssen unter Berücksichtigung von Zinsen vergleichbar gemacht werden. Entscheidend sind hierbei neben der Höhe der Zinsen auch die Höhe des Geldbetrags und der Zeitpunkt der Fälligkeit.

In der Zukunft fällige Geldbeträge haben bezogen auf den heutigen Zeitpunkt einen niedrigeren Wert, da diese Geldbeträge bei einer heutigen Anlage bis zum Zeitpunkt der Fälligkeit Zinsen erwirtschaften hätten können. Diese Diskontierung bzw. Abzinsung zukünftiger Zahlungen bezogen auf den heutigen Zeitpunkt wird wie folgt berechnet:

$$BW_0 = \frac{Z_t}{(1+i)^n}$$

Wobei der Barwert $BW_0$ dem Wert der Zahlung zum heutigen Zeitpunkt und $Z_t$ dem Wert einer zukünftigen, im Jahr t anfallenden (nominalen) Zahlung entsprechen. Der als Dezimalzahl in die Berechnung eingehende, inflationsbereinigte reale Zinssatz wird mit i bezeichnet und n entspricht der Anzahl der Jahre, die zwischen dem heutigen Zeitpunkt und dem Zeitpunkt der Fälligkeit von $Z_t$ liegen.

Eine Investition ist über ihre Laufzeit mit verschiedenen Zahlungsströmen verbunden. In einer Investitionsrechnung, die der Bewertung der Wirtschaftlichkeit dient, müssen somit alle über die Laufzeit zu erwartenden Ausgaben und Einnahmen berücksichtigt werden. In den folgenden Berechnungen wird ein dynamisches Verfahren der Investitionsrechnung angewendet, die Kapitalwertmethode (vgl. (167)), da diese dem Zeitpunkt der anfallenden Zahlungen Rechnung trägt.

Der Kapitalwert einer Investition errechnet sich aus der Differenz aller während einer Nutzungsdauer entstehenden summierten Barwerte der Einnahmen und der summierten Barwerte der Ausgaben. Er kann wie folgt bestimmt werden:

$$KW_0 = -I_0 + \sum_{t=1}^{t=n} \frac{(E_t - A_t)}{(1+i)^t}$$

Hierbei beschreibt $KW_o$ den Kapitalwert zum Bezugszeitpunkt, $I_o$ die Investition im Bezugsjahr, $E_t$ die Einnahmen am Ende des Jahres t, $A_t$ die Ausgaben am Ende des Jahres t und n entspricht der gesamten Laufzeit. Ist $KW_o$ positiv, so ist eine Investition wirtschaftlich. Im Falle einer erforderlichen zusätzlichen Investition, z. B. für einen Speicherersatz, im Betrachtungszeitraum wird diese Investition als eine Ausgabe $A_t$ in dem jeweiligen Jahr angesetzt.

## 11.2 Primärregelleistung

Auf Basis der Beschreibung der Anwendung in Kapitel 8.3.1.1 sowie der Bestimmung des Alterungsverlaufs und der darauf aufbauenden Restwertmodellierung (vgl. Kapitel 9 und 10) wird im Folgenden die Wirtschaftlichkeit einer Neubatterie und einer SL-Batterie für die PRL-Bereitstellung unter Anwendung der Kapitalwertmethode miteinander verglichen.

### Datengrundlage

Der Batteriespeicher zur Bereitstellung von PRL wird entsprechend der Beschreibung in Kapitel 8.3.1.1 ausgelegt und betrieben. Erlösseitig wird auf die Grenzleistungspreise aus (105) zurückgegriffen, um die optimale Angebotsstrategie zu bestimmen. Der aus Erlössicht optimale Leistungspreis für den betrachteten Zeitraum (Juli 2011 bis Dezember 2014) lag bei 16 €/MW*h und führt zu einer Zuschlagswahrscheinlichkeit von 89 %. Da die weitere Entwicklung der Leistungspreise nicht prognostizierbar ist, wird dieser Wert für die Zukunft als konstant fortgeschrieben. Im Falle einer Wettbe-

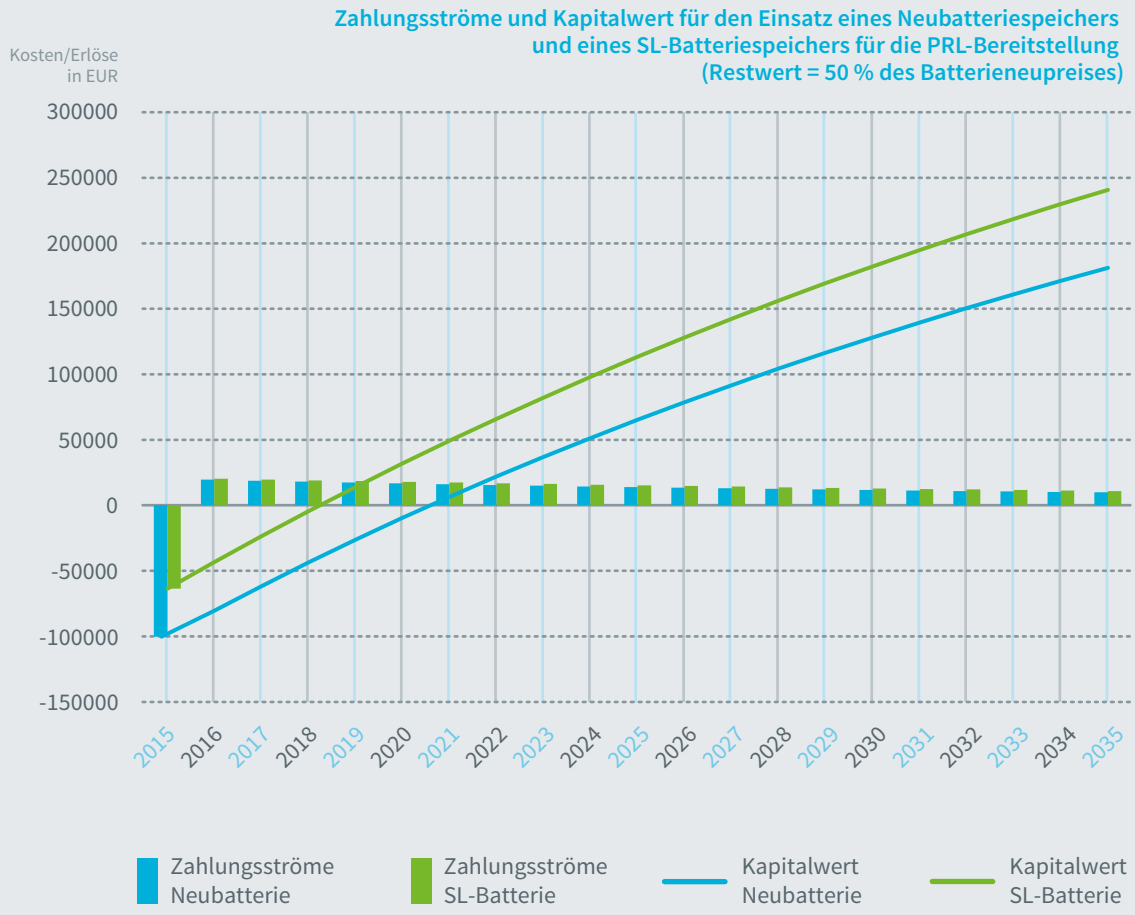
werbssteigerung, z. B. durch den Markteintritt einer Vielzahl an Batteriespeichern, können die erzielbaren Erlöse jedoch in Zukunft sinken.

Auf der Kostenseite sind neben den Investitionen und den fixen Betriebskosten zudem die Kosten für den Stromhandel zu berücksichtigen. Im Falle einer Installation einer SL-Batterie fallen analog zur Neubatterie zudem Kosten für die Peripherie und Leistungselektronik an. Für letztgenannte werden die Kosten in Zukunft vereinfacht als konstant angenommen und werden sowohl für Neubatterien als auch SL-Batterien als gleich angesetzt. Hierbei ist zu beachten, dass eine SL-Batterie aufgrund der geringeren Energiedichte ein größeres Volumen aufweist, weshalb die spezifischen Kosten je nutzbarer Kapazität höher ausfallen können. Auf der anderen Seite können ggf. einige Bauteile aus dem „First Life" übernommen werden, wodurch wiederum Kosten eingespart werden können. Darüber hinaus gibt es kostenintensive Bauteile, wie z. B. Wechselrichter, die unabhängig vom Batterietyp, also sowohl für Neubatterien als auch für SL-Batterien, gleichermaßen verbaut werden.

Die Kennwerte, die den Wirtschaftlichkeitsberechnungen zugrunde liegen, werden zusammenfassend in Tabelle T05 dargestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich um einen PRL-Speicher in einem konventionellen Anlagenpool handelt.

| | | |
|---|---|---|
| **Zinssatz** | 4 %/a | (168) |
| **Inflationsrate** | 2 %/a | |
| **Betrachtungszeitraum** | 20 a | |
| **Erlöse PRL-Bereitstellung** | 124 €/kW*a | Erlösoptimierte Strategie mit historischen Daten aus (105) |
| **Strompreis (Intraday) bzw. Erzeugungskosten der technischen Anlagen im Pool** | 33 €/MWh | Mittlerer Preis in 2014 nach (169) |
| **Batteriekosten** | 366 €/kWh | vgl. Kosten in 2015 aus Kapitel 6.2 |
| **Kosten für SL-Batterien ($K_{SLB,max}$)** | 183 €/kWh | Gemäß Restwertmodellierung ca. 50 % des Neupreises (vgl. Kapitel 10.2) |
| **Peripherie** | 90 €/kWh | (36) |
| **Leistungselektronik** | 150 €/kW | |
| **Fixe Betriebskosten** | 16,5 €/kW*a | |
| **Eo1L** | 80 % | vgl. Kapitel 7.3 |
| **Eo2L** | 40 % | |

**T05:** Kennwerte für die Wirtschaftlichkeitsbewertung der PRL-Bereitstellung




**A29:** Zahlungsströme und Kapitalwert für den Einsatz eines Neubatteriespeichers und eines SL-Batteriespeichers für die PRL-Bereitstellung (Restwert = 50 % des Batterieneupreises)

## Ergebnisse

Auf Basis der zuvor dargelegten Datenbasis und Annahmen werden für jedes Jahr des Abschreibungszeitraumes die (diskontierten) Zahlungsströme bestimmt und der Kapitalwert in Bezug auf das Jahr 2015 berechnet. Abbildung A29 zeigt, dass im Falle der reduzierten SL-Batteriekosten von 50 % des Batterieneupreises bezogen auf die nutzbare Kapazität eine Amortisation der Investition bereits in fünf Jahren eintritt. Im Gegensatz dazu beträgt die Amortisationszeit für einen neuen Speicher sieben Jahre. Dies ist zum einen auf die geringeren anfänglichen Investitionen, aber auch auf die geringeren Kapazitätsverluste (z. B. durch abschließende Formierungseffekte) zurückzuführen (vgl. Kapitel 9). Dies spiegelt sich auch in den in Abbildung 29 dargestellten Erlösströmen wider, welche für die Neubatterie stärker abnehmen als für die SL-Batterie.

Im Falle einer Überdimensionierung der SL-Batterie kann der Alterungsprozess noch weiter gemindert werden, jedoch wiegt die dadurch erzielbare Erlössteigerung die zusätzlichen Investitionen nicht auf. Es lässt sich somit festhalten, dass unter den getroffenen Annahmen aufgrund des besseren Alterungsverhaltens ein SL-Speicher für die PRL-Bereitstellung aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhafter sein kann als ein neuer Batteriespeicher.

## 11.3 Hausspeichersysteme

### Datengrundlage

Die Auslegung und Betriebsweise des AC-gekoppelten HSS erfolgt gemäß dem beschriebenen Fallbeispiel in Kapitel 8.3.1.2 sowie anhand des modellierten Alterungsverhaltens in Kapitel 9. Um die Wirtschaftlichkeit des Speichers zu bewerten, werden in der Wirtschaftlichkeitsberechnung nur die zusätzlichen Kosten und Erlöse des HSS berücksichtigt, nicht aber die der PV-Anlage. Die Ausgangssituation stellt somit ein Haushalt mit einer in 2015 errichteten PV-Anlage dar, welcher um ein HSS erweitert wird. Zur Berechnung der Erlöse wird für jedes Jahr der Anteil der indirekten Eigendeckung mit dem HSS am gesamten Stromverbrauch des Haushalts ermittelt. Da in Höhe dieser Energiemenge kein Strom aus dem Netz bezogen werden muss, entspricht diese Energiemenge multipliziert mit dem regulären Strompreis für Haushalte den Erlösen.

Die Kosten setzen sich aus den Investitionen des HSS, den zu einem späteren Zeitpunkt nötigen Batterieersatzkosten sowie der durch Erhöhung der Eigendeckung entgangenen PV-Einspeisevergütung zusammen. Sonstige Wartungs- und Instandhaltungskosten werden nicht berücksichtigt.

Die Batterieersatzkosten basieren auf den Annahmen in Kapitel 6.2 zur prognostizierten Batteriepreisentwicklung. Bei diesen Ersatzinvestitionen wird angenommen, dass die Batterie des HSS separat von Peripherie und Leistungselektronik nachgerüstet werden kann, sodass nur die Kosten der Batteriemodule angesetzt werden.

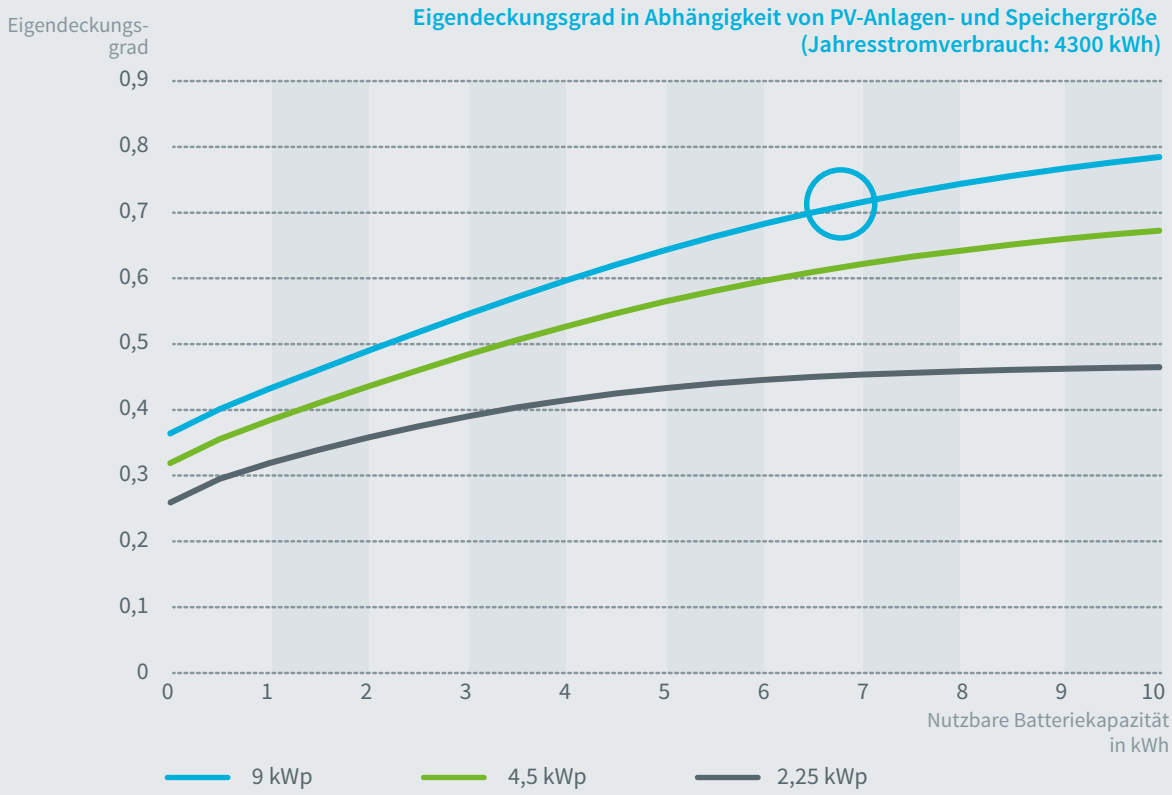
Der Kostenanteil einer Neubatterie mit Lithium-Ionen-Technologie an den gesamten Investitionen eines HSS variiert in verschiedenen Quellen. Nach (115) liegt der Kostenanteil einer 5 kWh Batterie bei etwa 51 %. Bei einer Auswertung der Daten von (170) ergibt sich ein Mittelwert von 36 %. Zum gleichen Ergebnis kam die Studie (171), in welcher eine detaillierte Kostenanalyse eines 10 kWh HSS vorgenommen wurde. Letzterer Wert wurde in den folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen verwendet. Demnach entsprechen die Kosten für Peripherie, Leistungselektronik aber auch Produktion, Marge etc. 64 % des Neusystempreises. Wie beim Fallbeispiel PRL werden zum besseren Vergleich die Systemkosten für SL-Batterie und Neubatterie gleich und über den Betrachtungszeitraum als konstant angenommen. Es wird weiterhin unterstellt, dass sowohl die PV-Vergütung als auch der Strompreis während der Nutzungsdauer von angenommenen 20 Jahren konstant sind bzw. mit der Inflationsrate ansteigen. Eine Prognose des zukünftigen Haushaltsstrompreises gestaltet sich äußerst schwierig, eine Fortschreibung der Preisentwicklung aus den vergangenen

5–10 Jahren würde einen jährlichen Anstieg der Kosten um ca. 3 % p. a. bedeuten. Ein Szenario, in dem die Wirtschaftlichkeitsrechnung eines HSS deutlich besser und z. T. auch mit positiver Rendite abschließt, ist in (168) dargestellt. Dieses Szenario erscheint nach einem nahezu konstanten Strompreis in 2014 gegenüber dem Vorjahr sowie Prognosen zu einer nahezu konstant bleibenden Umlage durch das EEG in den kommenden Jahren als eine eher zu drastische Steigerung. Der hier angenommene konstante Strompreis gegenüber der Inflation ist ein vergleichsweise konservativer Ansatz, der einen ersten Schätzwert für die Wirtschaftlichkeitsrechnungen darstellt. Die Kennwerte der Wirtschaftlichkeitsberechnung sind Tabelle T06 zu entnehmen.

| | | |
|---|---|---|
| **Zinssatz** | 4 %/a | (168) |
| **Inflationsrate** | 2 %/a | |
| **Abschreibungsdauer** | 20 a | |
| **Vergütung PV** | 12,57 ct/kWh | |
| **Endkundenstrompreis für Haushalte** | 30 ct/kWh | |
| **Batteriekosten** | 366 €/kWh | vgl. Kosten in 2015 aus Kapitel 6.2 |
| **Kosten für SL-Batterien ($K_{SLB,max}$)** | 183 €/kWh | Gemäß Restwertmodellierung ca. 50 % des Neupreises (vgl. Kapitel 10.2) |
| **Investition für neues HSS** | 1016,7 €/kWh | nach Kapitel 6.2 |
| **Investition für HSS mit SL-Batterien** | 833,7 €/kWh | s. o. |
| **Kostenanteil der Batterie am Neusystem** | 36 % | (171) |
| **Eigendeckung durch neues HSS** | 26,4 % | vgl. Kapitel 8.3.1.2 |
| **Eo1L** | 80 % | vgl. Kapitel 7.3 |
| **Eo2L** | 40 % | |

**T06:** Wirtschaftliche Kennwerte für HSS

Die Abnahme der Kapazität durch die Alterung der Batterie wurde in einer resultierenden Eigendeckungsgradabnahme basierend auf (172) angenähert. Dabei wurde die Änderung der Eigendeckung mit der Differentialfunktion des in Abbildung A30 dargestellten, oberen Graphen angenähert. Dieser Verlauf zeigt die Eigendeckung eines Haushaltes mit PV-Anlage und HSS in Abhängigkeit der nutzbaren Batteriekapazität. Der schwarze




**A30:** Eigendeckungsgrad in Abhängigkeit von PV-Anlagen und Speichergröße (Jahresstromverbrauch: 4300 kWh)

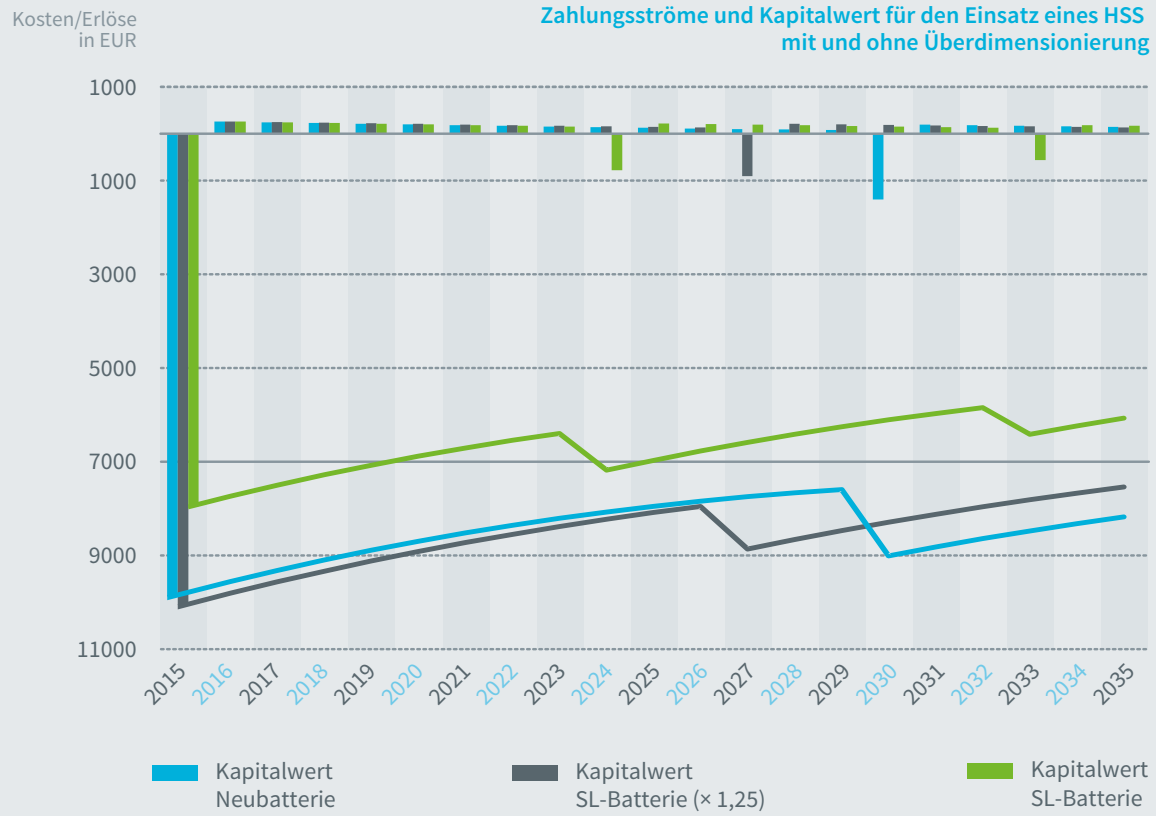
Kreis markiert etwa die Ausgangskonfiguration des Fallbeispiels. Die so berechnete, mittlere Eigendeckungsabnahme durch Alterung der Batterie beträgt etwa -5 %-Punkte je reduzierter Kilowattstunde.

## Ergebnisse

Basierend auf den zuvor beschriebenen Daten wurde für jedes Jahr der Barwert der Zahlungsströme zum Bezugsjahr 2015 gebildet. Darauf aufbauend wurde dann, wie Abbildung A31 zu entnehmen, der Kapitalwert der Investition gebildet.

Bei dem Einsatz von Neubatterien ist eine (erste) Ersatzinvestition der Batterien nach ca. 15 Jahren in 2030 notwendig, bei SL-Batterien gleicher Dimensionierung nach etwa 9 Jahren. Die Alterung von SL-Batterien ist zwar annähernd identisch zu der einer Neubatterie (vgl. Kapitel 9), allerdings beginnt die SL-Batterie mit einem Start-SoH von 80 %, so dass ein kleineres ΔSoH von 40% im Vergleich zu einer Neubatterie mit 60% ΔSoH genutzt wird. Im Betrachtungszeitraum müsste für die gleich dimensionierte SL-Batterie sogar ein dritter Batteriewechsel in 2033 erfolgen. Bestand das Ausgangssystem bereits aus SL-Batterien so wurde eine SL-Batterie als Ersatzbatterie gewählt, analog dazu eine Neubatterie sofern diese bereits im Ausgangssystem vorhanden war.

Die Alterungskurven für HSS haben gezeigt, dass ein hoher DoD maßgeblich verantwortlich für die Alterung ist, und durch eine Überdimensionierung der Batterie deutlich verzögert werden kann. In der Wirtschaftlich-




**A31:** Zahlungsströme und Kapitalwert für den Einsatz eines HSS mit und ohne Überdimensionierung

keitsbetrachtung wurde daher ein Fall aufgenommen, in dem die Batterie um den Faktor 1,25 überdimensioniert wurde (graue Kurve im Diagramm). Bei dem Einsatz der überdimensionierten SL-Batterie fällt die Ersatzinvestition nach 12 Jahren an, also 4 Jahre später als bei einer gleich dimensionierten SL-Batterie. Durch die geringere Alterung sind zudem leicht höhere Erlöse mit der überdimensionierten Batterie zu erzielen, erkennbar an der unterschiedlichen Steigung der Kurven. Insgesamt kann sich keiner der betrachteten Fälle innerhalb der Abschreibungsdauer amortisieren.

Im betrachteten Szenario fällt der Einsatz der gleich dimensionierten SL-Batterie, trotz zweimaligem Batteriewechsel, aufgrund der geringeren Anfangsinvestitionen wirtschaftlicher aus als der Einsatz eines Systems mit neuen Batterien oder überdimensionierten SL-Batterien, wobei auch letztere wirtschaftlicher sind als Neubatterien. Es ist zu erwähnen, dass die Wirtschaftlichkeit von HSS in dem Paper (168) positiver bewertet wurde. Gründe hierfür sind abweichende Eingangsdaten, insbesondere die Annahme, dass bereits für 2015 sehr günstige HSS-Preise vorherrschen sowie die Berücksichtigung der KfW-Förderung. Zudem sollte erwähnt werden, dass für Heimspeichersysteme optimierte LIZ-Typen (z. B. LFP) eine geringere zyklische Alterung aufweisen als Typen in LITB (z. B. NMC), jedoch nur letztere in SL-Batterien genutzt werden.

## 11.4 Fazit: Rentabilitätsbewertung

Für die PRL-Bereitstellung konnte der Kapitalwert am Ende des Betrachtungszeitraums im Falle einer SL-Batterie um 33 % von 181187 € auf 240827 € erhöht werden. Da jedoch nicht nur die Steigerung des mittel- bis langfristigen Kapitalwerts investitionsentscheidend ist, sondern auch die anfänglichen Investitionen, ist zudem die Reduktion der Investitionen um 30 % hervorzuheben.

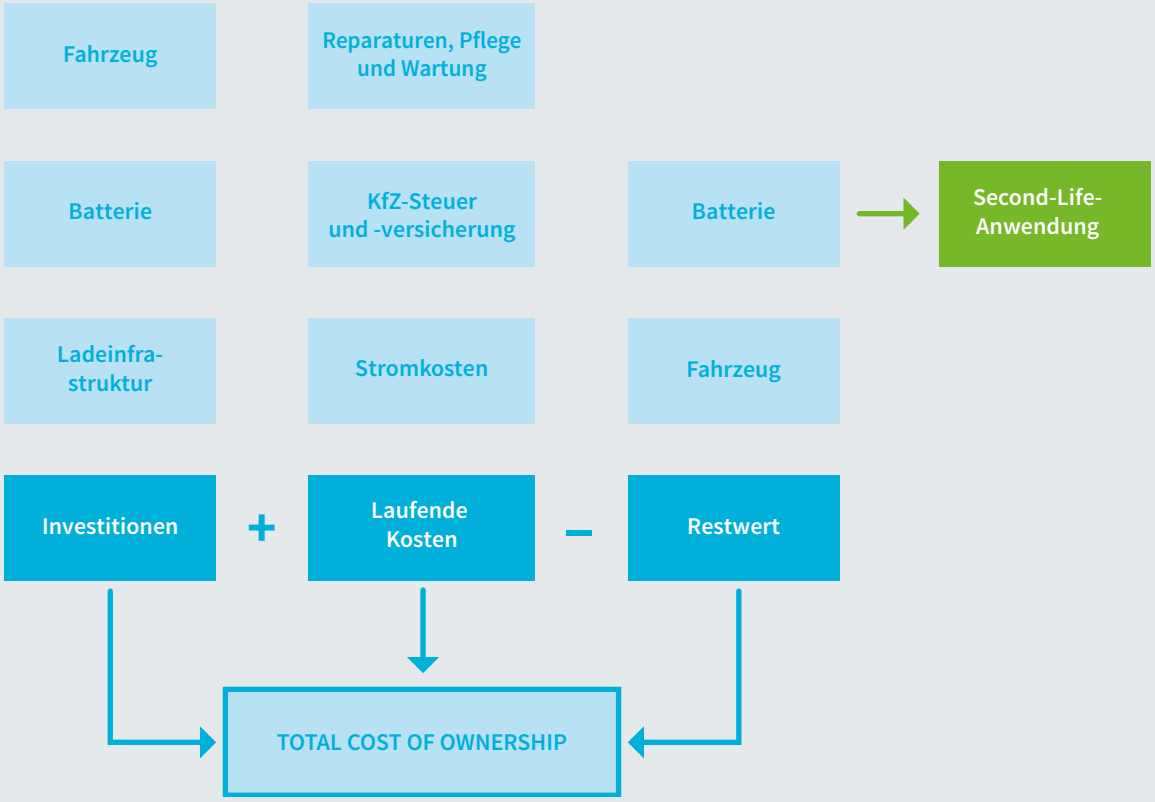
HSS in privaten Haushalten weisen im Gegensatz zur PRL-Bereitstellung in diesem Szenario keinen betriebswirtschaftlichen Nutzen auf. Insbesondere der sehr geringe jährliche Erlös, der ausschließlich durch Vermeidung von Netzbezug einhergeht, macht eine Amortisation unter den getroffenen Annahmen unmöglich. Erst durch stark fallende Einspeisevergütung und HSS-Systempreise sowie stark ansteigende Strompreise kann ein HSS rentabel werden. SL-Batterien können jedoch die Rentabilität der Anwendung aktuell deutlich verbessern bzw. die Verluste mindern. Insgesamt sind die Verluste mit SL-Batterien nach 20 Jahren um 26 % geringer (2129 €) als mit Neubatterien. Zudem sind die anfänglichen Investitionen im Falle von SL-Batterien um 18 % niedriger. Diese vergleichsweise geringe Reduktion der Investitionen resultiert aus dem geringen Anteil der Batteriekosten an den Gesamtkosten von nur 36 % eines Neubatteriesystems, im PRL-Anwendungsfall haben sie im Vergleich hierzu einen Anteil von 60 %. Die Notwendigkeit von Ersatzbatterien innerhalb des Betrachtungszeitraumes ist als technisches Risiko zu sehen, da die Verfügbarkeit der passenden Batterien vom Hersteller gewährleistet sein muss.

Insgesamt kann ein wirtschaftlicher Mehrwert durch SL-Batterien für beide Anwendungen festgestellt werden, wobei die PRL-Anwendung besser ausfällt. Es lassen sich zwei wesentliche Zusammenhänge für die Rentabilität von SL-Batterien in SL-Anwendungen ableiten:

- Das Reduktionspotenzial von SL-Batterien bei den Investitionen ist abhängig von dem Anteil der Batteriekosten an den Gesamtsystemkosten.

- Durch geeignete Beanspruchung der SL-Batterien kann die Degradation deutlich reduziert und damit die Rentabilität erhöht werden. Förderlich sind hierbei ein niedriger DoD, geringe Stromraten und gleichmäßig niedrige Temperaturen.

Unabhängig von der spezifischen SL-Anwendung kann der Restwert einer gebrauchten LITB ggf. einen zusätzlichen wirtschaftlichen Vorteil durch Senkung der Vollkosten von BEV bewirken. Dieser Zusammenhang wird im Folgenden näher beleuchtet.




**A32:** Schematische Zusammensetzung der Total Cost of Ownership eines Elektrofahrzeugs (eigene Darstellung basierend auf (173))

## 11.5 Total Cost of Ownership

Die TCO von BEV setzen sich, wie in Abbildung A32 vereinfacht dargestellt, aus den Investitionen und den laufenden Kosten abzüglich des Fahrzeug- und Batterierestwerts zusammen. Die Reduktion der TCO durch SL-Anwendungen ist somit prinzipiell durch eine Erhöhung des Restwerts möglich, wenn durch den Verkauf der gebrauchten LITB zusätzliche Erlöse erzielt werden können.

Wie in Kapitel 10 diskutiert, können die zusätzlichen Erlöse des Fahrzeugnutzers über den maximalen theoretischen Restwert $K_{Rest,max}$ der gebrauchten LITB bestimmt werden. Dieser ergibt sich aus der maximalen theoretischen Kostengrenze $K_{SLB,max}$ die ein SL-Betreiber für eine SL-Batterie zu zahlen bereit ist, abzüglich der Wiederaufbereitungskosten $K_{Auf}$. Der maximale theoretische Restwert $K_{Rest,max}$ stellt somit die Erlösobergrenze dar, die ein Fahrzeugnutzer für seine gebrauchte LITB erzielen kann.

Für das folgende Beispiel wird von einem hypothetischen Fahrzeug ausgegangen, das gemäß Garantieansatz 8 Jahre genutzt wird und am EoL im Jahr 2023 einen SoH von 80 % besitzt. Bei einem Batteriekostenverlauf gemäß (40) (vgl. Kapitel 6.2) beträgt der Batterieneupreis im Jahr 2023 in etwa 251 €/kWh. Bei einer Reduktion der Batteriekapazität von ursprünglich 22 kWh auf 17,6 kWh ergibt sich im Falle der in Kapitel 10 abgeleiteten Faustregel, dass $K_{SLB,max} \approx 50\,\% \cdot K_{Neu}$ beträgt, eine Kostengrenze für die

SL-Batterie von 2209 €. Werden die Wiederaufbereitungskosten mit 50 €/kWh angesetzt, ergibt sich daraus ein maximaler theoretischer Restwert $K_{Rest,max}$ der LITB, und somit ein TCO Reduktionspotenzial, von 1329 €. Bei einem Zinssatz von 2 % und einem heutigen Nettolistenpreis des Fahrzeugs mit Batterie von 35000 € entspräche dieser zusätzliche Erlös im Jahr 2023 umgerechnet einer Reduktion der Anschaffungskosten von nur 3 %.

Wird davon ausgegangen, dass die Batterie im Fahrzeug auch nach Ende des „First Life“ noch einen Wert besitzt, da das Fahrzeug als Gebrauchtwagen im Einsatz bleibt, verringert sich das erzielbare Kostenreduktionspotenzial durch die SL-Anwendung entsprechend. In (173) werden drei Methoden zur Restwertbestimmung von BEV vorgeschlagen. Neben dem Ansatz den Restwert eines Dieselfahrzeugs anzusetzen, besteht zudem der Ansatz, den Restwert des Fahrzeugs über den Verbrauchskostenvorteil des Zweitnutzers zu bestimmen. Ein weiterer Vorschlag ist die Verwendung von Regressionskurven. So wird in (34) der Restwert des Fahrzeugs mithilfe einer Regression des Verkaufspreises mit mehreren Einflussfaktoren durchgeführt, die auf einer Studie des Statistischen Bundesamtes basiert. Die Berechnung des Fahrzeugrestwerts RW erfolgt in (34) nach folgender Formel:

$$RW = e^{\alpha} \cdot e^{12 \cdot \beta_1 \cdot a} \cdot e^{\frac{\beta_2}{12} \cdot JFL} \cdot (NLP + k \cdot p_{Batt})^{\beta_3}$$

$a$ = Alter des Fahrzeugs/Fahrzeugnutzungsdauer
$JFL$ = Jahresfahrleistung
$NLP$ = Nettolistenpreis des Fahrzeugs ohne Batterie am Ende der Nutzungsdauer
$k$ = Kapazität der Batterie nach Nutzung
$p_{Batt}$ = Batteriepreis
*Weitere Parameter:*
Konstante $\alpha = 0{,}97948$
$\beta_1$ für die Variable Alter = -0,01437
$\beta_2$ für die Variable Monatsfahrleistung = -0,000117
$\beta_3$ für die Variable ln(Neupreis) = 0,91569

Um den Einfluss einer SL-Anwendung auf die TCO im Vergleich zu einer Weiternutzung der LITB im Fahrzeug zu bestimmen, muss der Restwert der im Fahrzeug weitergenutzten LITB bekannt sein. Der Restwert der Batterie im Fahrzeug kann mithilfe der obigen Formel über die Differenz zwischen dem Restwert des Fahrzeugs mit LITB und dem Restwert des Fahrzeugs ohne LITB (k=0) bestimmt werden. Gelten die gleichen

Annahmen wie für das oben beschriebene Beispiel und wird zudem ein Nettolistenpreis des Fahrzeugs mit Batterie im Jahr 2023 von 30000 € angenommen, so ergibt sich ein Nettolistenpreis des Fahrzeugs ohne Batterie (NLP) am Ende der Nutzungsdauer von 24478 €. Wird von einer Jahresfahrleistung (JFL) von 15000 km ausgegangen und die Werte in die Formel eingesetzt, beläuft sich der Restwert des Fahrzeugs mit LITB in 8 Jahren auf 7039 € und ohne LITB auf 6047 €. Der Restwert der im Fahrzeug weitergenutzten LITB beträgt somit 992 €.

Werden der Restwert für eine SL-Anwendung in Höhe von 1329 € dem Restwert der LITB im Fahrzeug von 992 € einander gegenübergestellt, ergibt sich im Falle eines Verkaufs der gebrauchten LITB für eine SL-Anwendung potenzielle zusätzliche Erlöse von 337 €. Dies entspricht einer Erhöhung des Fahrzeugrestwerts um 5 % von 7039 € auf 7375 € in 2023. Dieser zusätzliche Erlös entspricht umgerechnet einer Reduktion der Anschaffungskosten von nur 1 %.

In der Praxis hängen die zusätzlichen Erlöse und die damit einhergehende Reduktion der TCO aus Sicht des Fahrzeugnutzers jedoch von der jeweiligen Marktausgestaltung und der Konstellation der Akteure ab (174). Ist die Batterie im Besitz des Fahrzeughalters, so kann dieser die Batterie in Höhe des Restwerts an den Fahrzeughersteller oder ein aufbereitendes Unternehmen veräußern. In diesem Fall kann eine entsprechende Reduktion der TCO erzielt werden. Im Falle eines Leasingkonzepts, in dem die LITB im Besitz des Fahrzeugherstellers oder eines Dienstleisters bleibt, wird sich die SL-Anwendung hingegen nicht positiv auf die TCO des Fahrzeugnutzers auswirken.

Es lässt sich somit festhalten, dass die Auswirkungen von SL-Anwendungen auf die Anschaffungskosten von BEV als sehr gering eingestuft werden können, welches sich mit den Aussage anderer Studien (18) (19) (20) deckt. Grund hierfür sind die fallenden Batteriepreise und die aktuell sehr hohen Anschaffungskosten. Der tatsächliche Mehrwert einer SL-Anwendung wird hingegen erst im weiteren Verlauf geschaffen und kommt somit nicht dem Fahrzeugnutzer, sondern anderen Akteuren der Wertschöpfungskette zugute. Zudem ist zu beachten, dass auch geringe (positive) Restwerte gealterter LITB einen erheblichen Nutzen für die Gesellschaft mit sich bringen können, wenn zum Beispiel durch günstig verfügbar werdende SL-Batteriespeicher die Integration regenerativer Energien gefördert wird.

# 12 Ökologische Bewertung

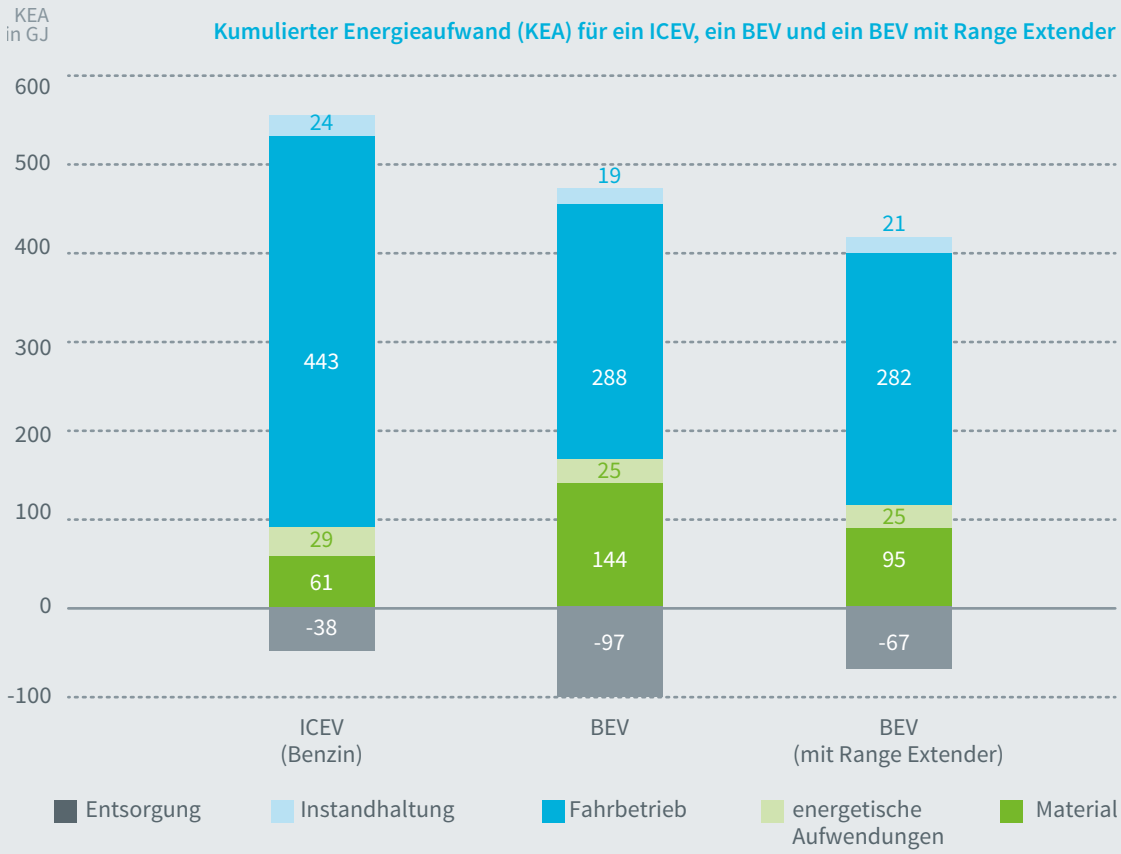
Da die ökologische Vorteilhaftigkeit ein grundlegender Gedanke von SL-Konzepten ist, wird nachfolgend auf die Potenziale von SL-Batterien zur Einsparung von Emissionen und Ressourcen eingegangen. Zunächst wird hierfür in Abschnitt 12.1 eine Übersicht über die Umweltwirkungen und kritischen Prozesse der Elektromobilität gegeben. Anschließend wird in Abschnitt 12.2 der aktuelle Forschungsstand der Ökobilanzierung von SL-Konzepten dargestellt und diskutiert. Auf Basis dessen können in Abschnitt 12.3 dann die Einsparpotenziale der beiden Fallbeispiele abgeschätzt werden. Ein abschließendes Fazit zur ökologischen Bewertung von SL-Konzepten wird in Kapitel 12.4 gegeben.

## 12.1 Umweltwirkungen der Elektromobilität

Die Umweltwirkungen der Elektromobilität wurden in den vergangenen Jahren in zahlreichen Forschungsprojekten und Studien thematisiert. In (175), (176), (177) und (178) werden die Ergebnisse verschiedener Ökobilanzstudien einander gegenübergestellt und diskutiert. Es können folgende Aussagen zu den Umweltwirkungen der Elektromobilität zusammengefasst werden:

Die Frage nach der Vorteilhaftigkeit von BEV gegenüber konventionellen Fahrzeugen (ICEV) kann nicht allgemeingültig beantwortet werden, sondern es bedarf einer genaueren Betrachtung in Abhängigkeit des Untersuchungsgegenstands, der Systemgrenzen und des Referenzsystems. Dies ist vor allem damit zu erklären, dass die Umweltwirkung von BEV u. a. stark von der Fahrzeuggröße, dem Antriebskonzept, dem berücksichtigten Strommix, der Fahrleistung, dem Fahrzyklus und dem Ladeverhalten abhängig ist. Zudem kann eine unterschiedliche Datenbasis und qualität zu Diskrepanzen zwischen verschiedenen Studien führen (175) (177).

In Bezug auf die Umweltwirkung der Batterieproduktion gilt es anzumerken, dass noch keine weitreichende Datenbasis für die Produktion und das Recycling von Batterien zur Verfügung steht (177). Bisherige Ökobilanzstudien zur Batterieproduktion kommen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, welches sich u. a. dadurch erklären lässt, dass die Emissionen stark von den verwendeten Materialien, dem Herstellungsprozess und der Art der Energiebereitstellung abhängig sind. Während der Wert in (179) eine Untergrenze darstellt, weisen andere Studien einen 1,3- bis 3,2-mal so hohen Emissionswert für die Batterieproduktion aus. (178) So ist beispielsweise die Produktion von NMC-Batterien, die auf Kobalt basieren, mit höheren Emissionen verbunden als die Produktion von LFP-Batterien. Durch eine zukünftige Steigerung der Energiedichte können diese erhöhten Emissionen jedoch ggf. in der Betriebsphase wieder ausgeglichen werden.




**A33:** Kumulierter Energieaufwand (KEA) für ein ICEV, ein BEV und ein BEV mit Range Extender nach (30)

Die hohe Umweltwirkung von lithiumbasierten Batterien ist vor allem auf den energieintensiven Trocknungsprozess zurückzuführen. (177) Materialien, die empfindlich auf Luftfeuchtigkeit reagieren, gehen aufgrund des Trocknungsprozesses mit einem besonders hohen Energieverbrauch einher. Zudem muss zwischen der Verwendung organischer Lösungsmittel und einem wasserbasierten Prozess unterschieden werden, da organische Lösungsmittel wiederum eine trockene Umgebungsluft benötigen. (178)

Es kann jedoch grundsätzlich festgehalten werden, dass sich die Umweltwirkungen für BEV aufgrund der Batterieproduktion von der Nutzungs- in die Herstellungsphase verschieben. Die erhöhten Aufwände für die Fahrzeugherstellung können insbesondere durch den energieeffizienteren Betrieb ausgeglichen werden (vgl. Abbildung A33). Die Umweltwirkungen der Produktionsphase können beispielsweise durch ein Recycling der Batterien gemindert werden. (177) Aufgrund des energieintensiven Trocknungsprozesses stellt zudem die Bereitstellung erneuerbarer Energie für den Produktionsprozess einen Hebel zur Senkung der Emissionen in der Batterieproduktion dar.

Wird für den Ladestrom der deutsche Strommix angesetzt, ist die Klimawirkung von BEV in etwa mit der Klimawirkung von ICEV vergleichbar. Durch den zunehmenden Einsatz erneuerbarer Energieträger für die Stromerzeugung kann der Einsatz von BEV jedoch zu einer erheblichen Minderung der Treibhausgas (THG)-Emissionen führen. (177) Da die Herkunft

der elektrischen Energie folglich eine ausschlaggebende Rolle für die Ökobilanz von BEV spielt, stellt die Bilanzierung der Emissionen der Stromerzeugung einen wichtigen Faktor dar. Diese kann mithilfe unterschiedlicher methodischer Ansätze erfolgen. So ist zum einen eine durchschnittliche Zuweisung der Emissionen über den Strommix denkbar. Zum anderen ist eine marginale Zuordnung unter Berücksichtigung von Systemeffekten durch den veränderten Kraftwerkseinsatz möglich. (175) Hierbei kann in Zukunft auch verstärkt der Zeitpunkt des Ladevorgangs Auswirkungen auf die Ökobilanz haben (180), da z. B. die Einspeisung emissionsarmer PV-Anlagen mittags größer ist als in den Abendstunden.

Das Gesamtresultat der Ökobilanz von BEV verschlechtert sich, wenn auch andere Wirkungskategorien hinzugezogen werden. So schneidet die Produktion eines BEV in den Kategorien Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog und Feinstaub aufgrund des Batterieproduktionsprozesses deutlich schlechter ab als die Produktion eines ICEV. Erst durch die Vorteile in der Betriebsphase, insbesondere im Falle eines zunehmenden Einsatzes regenerativer Energieträger für die Stromerzeugung, können BEV für diese Wirkungskategorien mit ICEV konkurrenzfähig werden. (177) Es können somit Zielkonflikte zwischen der Reduktion von THG-Emissionen und anderen Umweltwirkungen, die eher lokaler Natur sind (z. B. Versauerung), entstehen.

Für Batterien ist laut (175) zudem insbesondere die Frage der Ressourcenverfügbarkeit relevant, da Traktionsbatterien kritische Metalle, wie Nickel und Lithium, enthalten. Nickel ist trotz weitreichender globaler Vorräte, insofern kritisch, da es in Europa nur sehr geringe Vorräte gibt. Und auch Lithium geht aus europäischer Sicht mit Importabhängigkeiten und somit Versorgungsrisiken einher. Angesichts des steigenden Bedarfs durch die Elektromobilität ist in naher Zukunft zwar nicht von einer geologischen Knappheit auszugehen, jedoch ist eine Kreislaufführung des Lithiums angesichts möglicher Versorgungsengpässe notwendig. (175) Auch in (176) wird auf die Kritikalität von Lithium für die Elektromobilität hingewiesen, da für die dort untersuchten Mobilitätsszenarien eine Deckung des Bedarfs durch die gegenwärtigen Reserven zwar möglich, aber keineswegs gesichert ist. Zudem wird darauf hingewiesen, dass mit einer steigenden Nachfrage nach Lithium auch die Umweltwirkungen der Lithiumförderung, aufgrund der geringeren Konzentration von Lithium in der Salzlauge, steigen. Mögliche Verbesserungspotenziale werden insbesondere in der Weiterentwicklung der Batterietechnologie sowie der Verbesserung von Recyclingprozessen gesehen. Als weitere kritische Rohstoffe für die Elektromobilität werden in (176) neben dem in NMC-Batterien enthaltenen Cobalt zudem das zu den seltenen Erden zählende Dysprosium genannt, welches für Permanentmagnete in Elektromotoren benötigt wird. Auch hier sind eine Weiterentwicklung der Technologie und eine Verbesserung des Recyclings notwendig.

## 12.2 Ökobilanzierung von Second-Life-Batterien

Durch die Verlängerung der Lebensdauer von LITB im Rahmen von SL-Anwendungen wird sich ein ökologischer Nutzen im Sinne einer Einsparung von Emissionen und Ressourcen erhofft. Im Folgenden werden die Ansätze und Ergebnisse bisheriger Arbeiten, die sich explizit mit den Umweltwirkungen von SL-Konzepten auseinandersetzen, dargestellt und diskutiert.

### Vorstellung bisheriger Studien

Eine der aktuellsten Studien, die sich mit dem Umweltnutzen von gebrauchten LITB beschäftigt, stammt von Kim et al. aus dem Jahr 2015. Für die Bewertung der ökologischen Vorteile von SL-Batterien wird die Verwendung gebrauchter LITB aus EV der Produktion neuer LIB für stationäre Stromspeicher gegenübergestellt. Durch die Ermittlung des Treibhauspotenzials (GWP), des kumulierten Energieaufwands (KEA) sowie des abiotischen Ressourcenverbrauchs (ADP) wird die Frage des ökologischen Nutzens quantitativ bewertet. Betrachtet werden dabei die Produktion, Betriebsführung und Entsorgung, jedoch ohne auf die Nutzungsphase des Fahrzeugs oder den anschließenden Aufbereitungsprozess der SL-Batterie einzugehen. Um die Vorteile der SL-Batterie zu bestimmen, wurde ein Modell entwickelt, welches unter Berücksichtigung von Degradationsprozessen quantifiziert, wie viel Nennkapazität an Neubatterien durch SL-Batterien substituiert werden kann. Als funktionelle Einheit[1] dient dann die substituierbare Nennkapazität der SL-Batterie, die direkt mit der Nennkapazität einer Neubatterie verglichen werden kann. Die Ergebnisse werden für drei Szenarien, die sich u. a. hinsichtlich energiepolitischer Maßnahmen, Fahrleistungen wie auch technischer Weiterentwicklungen unterscheiden, für die Schweiz bis zum Jahr 2035 bzw. 2050 dargestellt. Die Studie zeigt, dass durch die Substitution von Neubatterien durch SL-Batterien ein Umweltnutzen generiert werden kann. Dieser ist auf die verlängerte Lebensdauer der LITB und die dadurch vermiedene Produktion von Neubatterien für stationäre Speicheranwendungen zurückzuführen. (17)

Ähnlich wie in (17) stellen auch Genikomsakis et al. einen Ansatz zur ökologischen Bewertung von LITB aus EV unter Berücksichtigung von SL-Anwendungen vor. In der Studie wird ein SL-Batterie-Szenario zwei

1 Die funktionelle Einheit quantifiziert die Funktion und damit den Nutzen eines Produktes bzw. einer Dienstleistung und bildet die Bezugsgröße der Ökobilanz. Sie dient zudem der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systeme mit der gleichen Funktion.

Szenarien mit Neubatterien gegenübergestellt, um eine Verringerung der Umweltbelastung durch die Verwendung von SL-Batterien als PV-Pufferspeicher zu bestimmen. Dabei wird in allen Szenarien die Herstellung und Nutzung der Traktionsbatterie berücksichtigt. Für die Szenarien mit Neubatterie werden zudem die Entsorgung der gebrauchten Traktionsbatterie sowie die Produktion einer neuen LIB für den Einsatz in der PV-Anwendung bilanziert. Im Falle eines Einsatzes der SL-Batterie fließt im Anschluss an die SL-Anwendung die Entsorgung der LIB mit ein. Mithilfe der definierten Szenarien und auf Basis der berechneten Umweltindikatoren GWP und Eco-Indikator 99 kommt auch diese Studie mit Ortsbezug Spanien zu dem Resultat, dass der Einsatz von gebrauchten LITB in SL-Anwendungen mit einem Umweltnutzen einhergeht. (16)

Eine Bewertung der ökologischen Durchführbarkeit von SL-Anwendungen für LITB wurde von Ahmadi et al. für Kanada vorgenommen. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Arbeiten wird im Rahmen dieser Studie die Anwendung bewertet, nicht jedoch ein Vergleich zwischen SL-Batterie und der Konkurrenztechnologie Neubatterie gezogen. Der Einsatz von SL-Batterien aus Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen (PHEV) zur Glättung der Last wird mit konventionellen Fahrzeugen bzw. PHEV und dem Einsatz eines Spitzenlast-Gaskraftwerks verglichen. Es werden die Bereiche Produktion, Fahrzeugnutzung, Batterieaufbereitung und die Lastglättung betrachtet. Da Recycling in allen Szenarien notwendig ist, wird dieses nicht explizit berücksichtigt. Es zeigt sich, dass bei der Herstellung des konventionellen Fahrzeugs im Vergleich zu dem EV mit der emissionsintensiven LIB-Herstellung zwar geringere $CO_2$-Emissionen generiert werden, jedoch trotz zusätzlichem Aufbereitungsaufwand Vorteile durch den Einsatz in der SL-Anwendung entstehen können. Begründung hierfür sind die deutlich geringeren $CO_2$-Emissionen, die mit der Spitzenlastreduktion durch SL-Batterien im Vergleich zu einer Spitzenlastdeckung durch Gaskraftwerke einhergehen. (15)

Faria et al. konzentrierten sich bei der Beurteilung der Umweltwirkungen ebenfalls auf die SL-Anwendung und stellen keinen direkten Vergleich zu Neubatterien an. Dabei werden im ersten Leben verschiedene Fahrprofile sowie im SL drei verschiedene Strommixe mit unterschiedlichen Anteilen erneuerbarer, atomarer und fossiler Energie betrachtet. Bei der Zweitanwendung als stationärer Energiespeicher in Haushalten wurden mit der Spitzenlastkappung und der Lastverschiebung zwei verschiedene Speicherstrategien untersucht. Diesen werden keine Umweltwirkungen aus dem Leben im Fahrzeug zugeordnet. Als Referenz wird der herkömmliche Strombezug des Haushalts aus dem Netz herangezogen. Zusammenfassend stellten die Autoren mithilfe der verwendeten Umweltkategorien (abiotischer Abbau, Versauerung, Eutrophierung und Klimawandel) fest, dass der Einsatz von SL-Batterien für die Lastverschiebung von Hochlast-

zu Niedriglastzeiten, verglichen mit einem herkömmlichen Netzbezug, aus ökologischen Gesichtspunkten nicht immer vorteilhaft ist. Denn die eingesparten Emissionen sind auf der einen Seite von den tageszeitlichen Schwankungen des Strommixes und auf der anderen Seite von den zusätzlichen Verlusten der Batterie abhängig. (13)

Sathre et al. hingegen bewerten den Einsatz von SL-Batterien für die Integration von EE im Vergleich zur Strombereitstellung durch Gaskraftwerke, die ansonsten zum Einsatz kämen. Es wird somit die Auswirkung des Einsatzes von SL-Batterien zur Integration von EE auf die kalifornische Energie- und Treibhausgas-Bilanz in Abhängigkeit der zukünftigen Marktdurchdringung der Elektromobilität und des EE Ausbaus untersucht. Die Systemgrenzen für die SL-Anwendung umfassen den notwendigen Transport der gebrauchten LITB, die Aufbereitung und den Betrieb in der SL-Anwendung. Keine Berücksichtigung finden die Batterieproduktion, der Fahrzeugbetrieb und das Recycling. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass SL-Batterien durch die Integration zusätzlicher EE und die damit einhergehende Verringerung der THG-Emissionen eine relativ geringe, aber nicht unwichtige Rolle im kalifornischen Energiesystem der Zukunft spielen können. (14)

### Diskussion der Ergebnisse

Der Fokus der meisten Studien, die sich mit SL-Konzepten beschäftigen, liegt auf der Wirtschaftlichkeit, der technischen Umsetzbarkeit und, wenn überhaupt, nur in geringen Anteilen auf ökologischen Bewertungen. In den oben beschriebenen Arbeiten wurde jedoch der hohe Stellenwert einer Bewertung von Umweltwirkungen von SL-Konzepten erkannt und erörtert. Bei genauerer Betrachtung der Inhalte der fünf identifizierten Studien lässt sich feststellen, dass es zwei unterschiedliche Ansätze für ökologische Bewertungen von SL-Konzepten gibt. Während Kim et al. (17) und Genikomsakis et al. (16) eine Bewertung von SL-Batterien im Vergleich zu Neubatterien vornehmen, beschäftigen sich die anderen Arbeiten (13) (14) (15) mit der Bewertung von SL-Anwendungen und den für die Anwendung infrage kommenden Konkurrenztechnologien, wie z. B. Gaskraftwerken. Es wird deutlich, dass sich der ökologische Nutzen je nach gewähltem Ansatz unterscheiden kann.

Die Studien, die SL-Batterien einem Vergleich mit Neubatterien unterziehen, verfolgen zwar unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Wahl der Szenarien, der funktionellen Einheit und der Modellbildung, sie kommen aber übereinstimmend zu dem Schluss, dass die Verlängerung des Batterielebens deutliche ökologische Vorteile im Vergleich zu der Produktion einer neuen LIB mit sich bringt. Wird also durch die SL-Batterie eine neue

Batterie verdrängt, ist davon auszugehen, dass dieses mit einem ökologischen Einsparpotenzial einhergeht. Die Höhe des Emissions- und Ressourceneinsparpotenzials hängt dann von verschiedenen Faktoren ab. Eine ausschlaggebende Einflussgröße auf das Einsparpotenzial ist die Umweltwirkung, die mit der Produktion der neuen Batterie einhergeht. Zudem ist die Berücksichtigung des Alterungsverhaltens von Bedeutung, da dieses die verfügbare Kapazität, die Nutzungsdauer und den Wirkungsgrad der Batterie beeinflusst (vgl. Kapitel 9). Weitere Faktoren, die sich auf das Einsparpotenzial auswirken, sind der Aufwand, der mit der Aufbereitung der SL-Batterie einhergeht, und die Verlagerung des Recyclingprozesses auf einen späteren Zeitpunkt (s. Abschnitt 10.5).

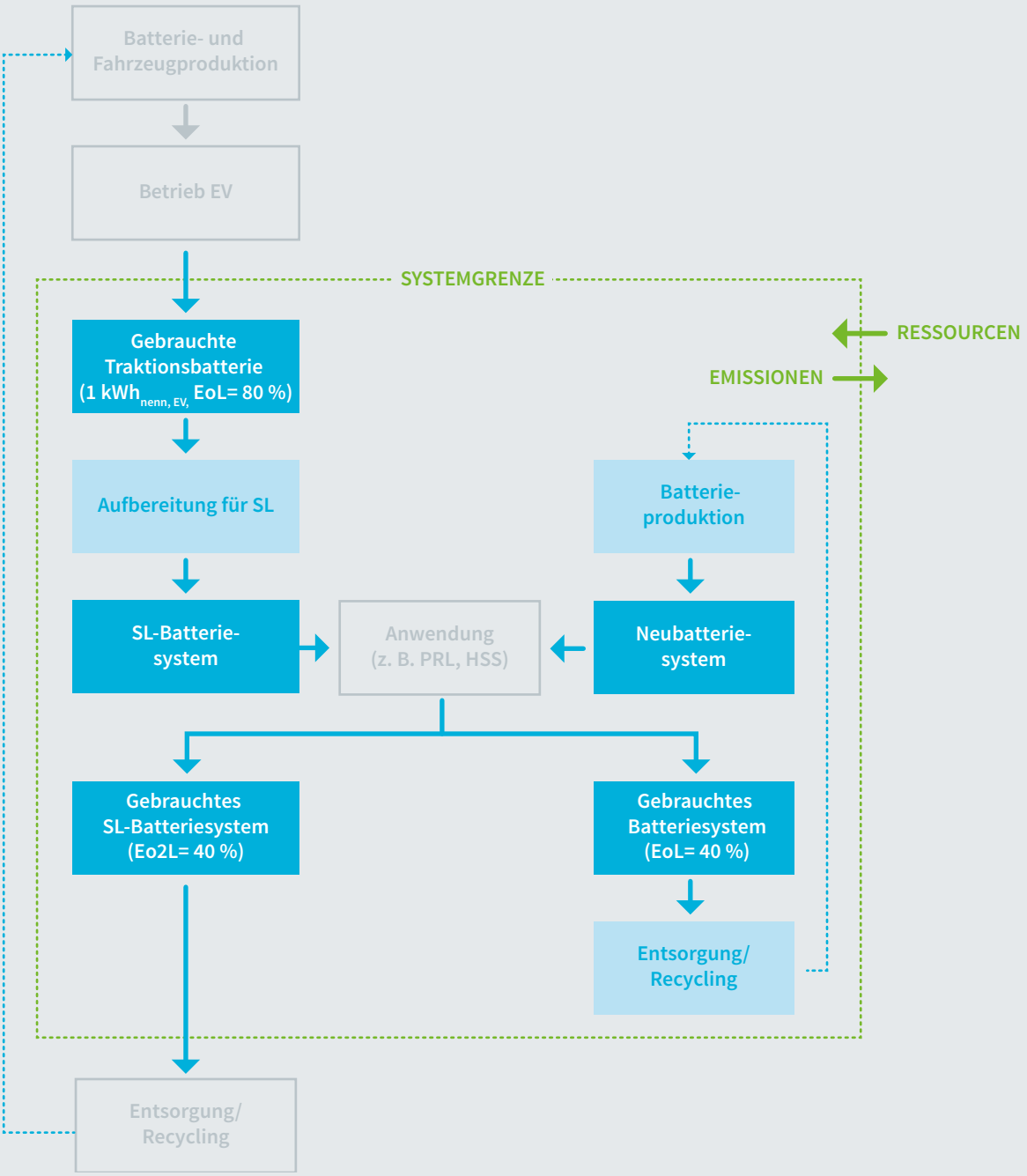
Wird durch die SL-Batterie hingegen eine neue Batteriespeicheranwendung induziert, z. B. aufgrund von günstigeren Anschaffungskosten, kann nicht zwangsweise von einem positiven Umwelteffekt ausgegangen werden, da ein Einsatz von Batteriespeichern nicht per se ökologisch vorteilhaft ist. Das erzielbare Einsparpotenzial hängt dann von dem ökologischen Nutzen der neu geschaffenen Batterieanwendung sowie dem Vergleich mit gegebenenfalls konkurrierenden Technologien ab. Die Anwendung kann beispielsweise ökologisch sinnvoll sein, wenn durch die SL-Batterie zusätzliche EE in das System integriert werden und SL-Batterien besser abschneiden als andere Ansätze zur Energiespeicherung bzw. Lastverschiebung, wie z. B. Pumpspeicher oder Demand Side Management. Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz von SL-Batterien in mobilen Anwendungen und die damit möglicherweise einhergehende Verdrängung emissionsintensiver Verbrennungsmotoren.

## 12.3 Ökologische Bewertung der Fallbeispiele

Basierend auf den Erkenntnissen bisheriger Studien sowie unter Berücksichtigung der Vielzahl an Faktoren, die sich auf das Einsparpotenzial auswirken können, werden im Folgenden die Umweltwirkungen der Fallbeispiele „Primärregelleistung“ und „Hausspeichersysteme“ untersucht und diskutiert.

### Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der folgenden Untersuchung ist die Bestimmung des THG-Einsparpotenzials von SL-Batterien im Vergleich zu einer Produktion von Neubatterien für die beiden SL-Anwendungen „Bereitstellung von PRL“ und „Einsatz als HSS“. Als funktionelle Einheit wird eine gebrauchte LITB aus einem EV mit einer Nennkapazität (vor dem Einsatz im EV) von 1 kWh




**A34:** Systemgrenze und berücksichtigte Prozesse der untersuchten Fallbeispiele

und einem EoL von 80 % gewählt. Die gebrauchte LITB besitzt somit bei Eintritt in die SL-Anwendung eine Nennkapazität von 0,8 kWh.

Die Systemgrenze und die berücksichtigten Prozesse sind in Abbildung A34 dargestellt. Die gebrauchte Traktionsbatterie aus dem Elektrofahrzeug wird zunächst für die SL-Anwendung aufbereitet und anschließend einer PRL- bzw. HSS-Anwendung zugeführt. Die Entsorgung der SL-Batterie wird, genau wie die ursprüngliche Produktion der Traktionsbatterie, dem Elektrofahrzeug zugerechnet. Die Einspareffekte, die durch die zeitliche Verschiebung des Recyclingprozesses ggf. erzielt werden können, werden

in der folgenden Berechnung nicht berücksichtigt, sondern anschließend qualitativ diskutiert.

Als Referenzprozess wird die Produktion einer Neubatterie mit dem gleichen Nutzen wie die SL-Batterie herangezogen. Dabei wird neben der geminderten Kapazität nach Nutzung im EV auch die Alterung der SL-Batterie und der neuen Batterie in der SL-Anwendung gemäß Kapitel 9 berücksichtigt, um die Nennkapazität der substituierten Neubatterie zu bestimmen. Unter Berücksichtigung der Kapazitätsverluste sowie der Nutzungsdauer der SL-Batterie und der Neubatterie beträgt die substituierbare Nennkapazität der Neubatterie für die PRL-Bereitstellung 0,65 kWh und für die HSS-Anwendung 0,58 kWh. Als finales Entsorgungskriterium gilt für beide Prozesse ein SoH von 40 %. Der Entsorgungs- bzw. Recyclingprozess der Neubatterie findet in dieser Betrachtung ebenfalls Berücksichtigung, da die Produktion und somit auch die Entsorgung der Batterie explizit für diese Anwendung erfolgt.

Die Anwendung als solche wird nicht bilanziert, da die mit der Anwendung einhergehenden Emissionen für den SL- und den Referenzprozess gleich sind. Hier wird somit vereinfacht angenommen, dass sich der Wirkungsgrad der Neubatterie und der SL-Batterie nicht unterscheiden.

### Berechnung und Datengrundlage

Das THG-Einsparpotenzial wird über die vermiedenen Emissionen für die substituierte Neubatterie abzüglich der Aufwände für die Aufbereitung der SL-Batterie bestimmt. Die vermiedenen Emissionen für die Neubatterie werden mithilfe der substituierbaren Nennkapazität (vgl. Ziel und Untersuchungsrahmen) sowie der spezifischen Emissionen der Batterieproduktion und -entsorgung berechnet.

Die Sachbilanzdaten für die Batterieproduktion stammen aus Notter et al. (179) (181). Die spezifischen Emissionen der bilanzierten Materialien, des Strombedarfs sowie der Entsorgung der Batterie werden der Ökobilanzdatenbank Ecoinvent Version 3 (182) entnommen. Die Emissionen des Entsorgungsprozesses werden in (182) vollständig der Batterie zugeordnet, so dass zunächst keine Gutschrift der Wertstoffe aus dem Recyclingprozess erfolgt. Im Falle einer Gutschrift würde sich das Einsparpotenzial entsprechend verringern.

Die berechneten spezifischen Emissionen der Batterieproduktion belaufen sich auf 6,6 kg $CO_2$-Äquivalente pro kg Batterie und liegen somit nur knapp über dem in Notter et al. (181) ausgewiesenen Wert von 6 kg $CO_2$-Äquivalenten. Bei einem Gewicht einer Fahrzeugbatterie mit einer

34 kWh-Nennkapazität von 300 kg (181) entspricht dies umgerechnet 58 kg $CO_2$-Äquivalenten je kWh Nennkapazität. Wird zudem die Entsorgung der Batterie berücksichtigt, erhöhen sich die spezifischen Emissionen der Neubatterie auf 69 kg $CO_2$-Äquivalente je kWh Nennkapazität.

Der Vergleich mit anderen Studien in (178) zeigt, dass der Wert für die Batterieproduktion aus Notter et al. (181) eine Untergrenze darstellt, da andere Studien einen bis zu 3,2-mal so hohen Wert ausweisen. Grund für die hohe Energiedichte und die wesentlich geringeren Emissionswerte ist die Betrachtung einer modernen nickel- und kobaltfreien $LiMn_2O_3$-basierten LIB, deren aktive Materialien wassergelöst sind. Da die berechneten Emissionen somit eher den zukünftigen Stand der Technik abbilden, werden die Ergebnisse im Folgenden als Spannbreite zwischen dem berechneten und dem maximalen Wert nach (178) ausgewiesen.

Für die Bestimmung der mit dem Aufbereitungsprozess verbundenen Emissionen werden für die Herstellung der Peripherie und für den Strombedarf im Aufbereitungsprozess die gleichen Daten wie für die Neubatterie verwendet. Es ist jedoch zu beachten, dass einige Speicherkomponenten von dem Volumen der Batterie abhängig sind und für eine SL-Batterie, die die gleiche Kapazität wie eine Neubatterie besitzt, größer ausgelegt werden müssen. Da dies vor allem für das Gehäuse der Fall ist, wird der Stahlbedarf entsprechend skaliert.

### Ergebnisse und Diskussion

Durch die SL-Anwendung ergibt sich für ein EoL-Kriterium von 80 % ein THG-Einsparpotenzial je kWh Nennkapazität der Traktionsbatterie von 34 bis 106 kg $CO_2$-Äquivalenten für die Bereitstellung von Primärregelleistung und von 30 bis 95 kg $CO_2$-Äquivalenten für den Einsatz als Hausspeichersystem. Wird der Mittelwert dieser Spannbreite angesetzt und angenommen, dass von der Gesamtnachfrage nach PRL von ca. 650 MW (s. Kapitel 8.3.1.1) 10 % durch Batteriespeicher gedeckt werden, ergibt sich ein THG-Einsparpotenzial von knapp 7100 Tonnen $CO_2$-Äquivalenten. Dies entspricht für den aktuellen Strommix in etwa den jährlichen Emissionen des Strombedarfs von ca. 3200 Haushalten. Wären die in 2014 zugebauten 10111 PV-Speicher mit einer durchschnittlichen nutzbaren Kapazität von 6,6 kWh (vgl. Kapitel 8.3.1.2) stattdessen durch SL-Batterien bereitgestellt worden, läge das Einsparpotenzial ebenfalls in der Größenordnung von ca. 7100 t $CO_2$-Äquivalenten. Das insgesamt erzielbare Einsparpotenzial von SL-Batterien hängt somit stark von der Größe der Batteriespeichermärkte ab.

Neben einem THG-Einsparpotenzial kann zudem von einem Ressourceneinsparpotenzial ausgegangen werden. Dieses wird zum einen durch die

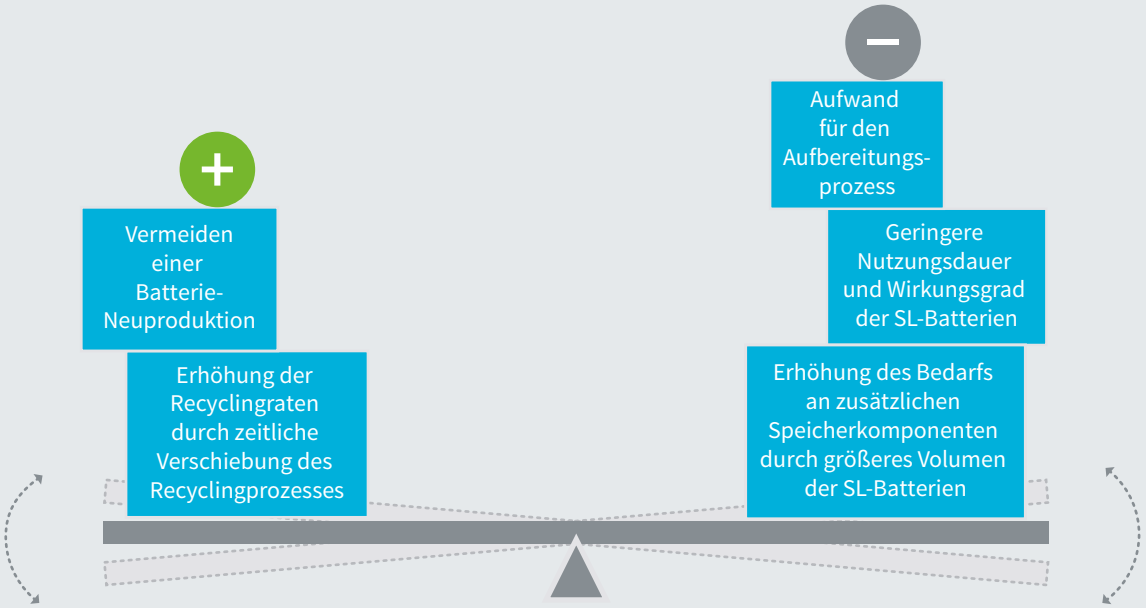
Verhinderung einer Entnahme neuer Ressourcen für die Batteriespeicheranwendung erreicht. Zum anderen führt die zeitliche Verzögerung des Recyclingprozesses der Traktionsbatterie durch die Zweitanwendung zu einer erhöhten Ausbeute an Sekundärrohstoffen, da in Zukunft von einer Verbesserung der Recyclingtechnologie ausgegangen werden kann. Zwar wird die gebrauchte LITB aufgrund der Weiterverwendung in einer SL-Anwendung zunächst nicht dem Recyclingprozess zugeführt, so dass die eigentlich gewonnenen Sekundärrohstoffe zu diesem Zeitpunkt nicht zur Verfügung stehen. Nach dem Einsatz für die PRL-Bereitstellung oder als HSS wird die SL-Batterie jedoch dem Recyclingprozess zugeführt, welcher zu diesem späteren Zeitpunkt aufgrund technologischer Fortschritte mit einer höheren Wiedergewinnung von Sekundärrohstoffen einhergeht.

## 12.4 Fazit und Ausblick: Ökologische Bewertung

Die Einsparung von Emissionen und die Schonung von Ressourcen können einen Zielkonflikt darstellen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die Elektromobilität, mithilfe derer auf der einen Seite die Emissionen im Verkehrssektor reduziert werden können, die jedoch auf der anderen Seite mit einem Einsatz kritischer Materialien, z. B. für die Traktionsbatterien, verbunden ist. Ansätze, um diesen Zielkonflikt zu lösen und die mit der Elektromobilität verbundenen Emission weiter zu senken, sind neben der Verbesserung des Recyclingprozesses auch die Steigerung der Rohstoffproduktivität durch Verlängerung der Nutzungsdauer der Batterie in SL-Anwendungen. Gemäß der Abfallhierarchie nach §6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) gilt für die Wahl der EoL-Strategie folgende Rangfolge:

1. Vermeidung
2. Vorbereiten zur Wiederverwendung
3. Recycling
4. sonstige Verwertung (insb. energetische Verwertung und Verfüllung)
5. Beseitigung

Dies zeigt, dass die Wiederverwendung dem eigentlichen Recyclingprozess vorgelagert ist.




**A35:** Einflussfaktoren auf das ökologische Einsparpotenzial von Second-Life-Konzepten

Wird durch die SL-Batterien eine Produktion von Neubatterien vermieden, so kann, wie in dem Fallbeispiel auch quantitativ gezeigt, von einem ökologischen Einsparpotenzial ausgegangen werden. Wird durch eine SL-Batterie jedoch eine zusätzliche Batteriespeicheranwendung ausgelöst, so ist der ökologische Nutzen von der Umweltwirkung der Anwendung und der Umweltwirkung der konkurrierenden Technologien, z. B. andere Speicher oder Verbrennungsmotoren, abhängig.

Bei einem Vergleich mit einer neuen Batterie nimmt die Höhe des Einsparpotenzials von SL-Batterien mit einer Verbesserung des Batterieproduktionsprozesses, z. B. aufgrund einer verstärkten Nutzung von Sekundärrohstoffen, einer Energiebereitstellung aus EE oder einer Substitution emissionsintensiver Materialien, in Zukunft ab. Ein Einsparpotenzial bleibt jedoch bestehen, so lange die Emissionen für die Aufbereitung geringer sind als die Emissionen der substituierten Batterieproduktion.

Basierend auf den vorherigen Ausführungen und Ergebnissen können abschließend folgende positive und negative Einflussfaktoren auf das ökologische Einsparpotenzial von SL-Konzepten identifiziert werden:

Weiterer Forschungsbedarf besteht zum einen im Hinblick auf die Quantifizierung der Emissionen des Produktions-, Aufbereitungs- und Recyclingprozesses von Batterien. Zum anderen sollten die Zusammenhänge zwischen SL-Konzepten und Ressourcenbedarf einer detaillierteren Betrachtung unterzogen werden, da sich beispielsweise durch die zeitliche Verschiebung des Entsorgungsprozesses der Traktionsbatterie die Chancen auf ein verbessertes Recycling und somit eine größere Rückgewinnungsquote von Sekundärrohstoffen erhöhen. Zudem sollten nähere Untersuchungen zu der Umweltwirkung von SL-Batterien im Falle einer Schaffung neuer Batteriespeicheranwendungen und den damit einhergehenden konkurrierenden Technologien durchgeführt werden.

# 13 Fazit

Second-Life (SL)-Konzepte für gealterte Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (LITB) haben nach den Erkenntnissen der vorliegenden Studie ökonomisch und ökologisch ein beachtliches Potenzial, wenn der Markt für batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Batteriespeicher weiter wächst. Zur vollen Erschließung dieses Potenzials sind insbesondere technische Fortschritte im Wiederaufbereitungsprozess, die Schaffung einer eindeutigen Rechtssituation im Hinblick auf Sicherheits- und Qualitätsanforderungen und eine Standardisierung von Batteriebauteilen und Fertigungsprozessen notwendig.

Zwei Anwendungen von SL-Batterien erscheinen aus heutiger Sicht besonders zukunftsträchtig: Der Einsatz für die Bereitstellung von Primärregelleistung (PRL) und die Verwendung in Hausspeichersystemen (HSS). Hinzu kommen, der Nachfrage verschiedener Stakeholder entsprechend, denkbare Anwendungsmöglichkeiten in der Notstromversorgung, für den Antrieb von Flurförderfahrzeugen, im Spitzenlastmanagement von Großverbrauchern und zur Leistungspufferung in Schnellladesäulen. Insgesamt kann angesichts dieser vielfältigen Einsatzmöglichkeiten bei einem steigenden Absatz von LITB für Elektrofahrzeuge von einem stark wachsenden Marktpotenzial für SL-Batterien ausgegangen werden.

Die vier Kernprozesse, die ein SL-Konzept kennzeichnen, sind der Einsatz der Traktionsbatterie im Fahrzeugbetrieb („First Life“), die Wiederaufbereitung dieser Batterie, die SL-Anwendung und schließlich das im Batteriegesetz vorgeschriebene Recycling. Die Kosteneffizienz der Wiederaufbereitung stellt einen wesentlichen Stellhebel für die Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit eines SL-Konzeptes dar. Der Wiederaufbereitungsprozess gliedert sich in mehrere Teilprozesse: Ausbau der LITB aus dem BEV, das Zerlegen der LITB in ihre Module, die Auswahl der für eine Weiterverwendung geeigneten Module sowie die Montage ausreichend leistungsfähiger SL-Batterien.

Die wirtschaftliche Effizienz von SL-Konzepten hängt vor allem vom optimalen Umgang mit dem Alterungsverhalten der Batterie ab. Zwei physikalische Phänomene sind dabei besonders zu beachten: Die zunehmende Streuung von Zellparametern und eine sich verstärkende, nichtlineare Alterung.

Aufgrund zunehmender Parameterstreuung im Alterungsverlauf müssen bei der Wiederaufbereitung die Zellen aufwendig vermessen werden (i. d. R. Kapazitätsmessung), um die weiter verwendbaren Module auszuwählen. Idealerweise würde diese Auswahl durch ein Zustands-Monitoring während des Fahrzeugbetriebs und anschließender Datenauswertung der gebrauchten LITB entfallen. Auch Alterungsschnelltests könnten helfen, den Aufwand bei der Selektion weiterverwendbarer Batteriemodule zu reduzieren.

Ein plötzlicher nichtlinearer Abfall der Batteriekapazität kann aufgrund kurzer Rest-Betriebszeiten die Weiterverwendung von Fahrzeugbatterien in SL-An-

wendungen erschweren oder gänzlich verhindern. Es kommt also darauf an, die Wiederaufbereitung vor dem Eintreten eines rapiden Kapazitätsverlustes zu beginnen, also rechtzeitig von einer höheren Last im „First Life“ auf eine mildere Last in der Zweitanwendung zu wechseln. Denn niedrige Laderaten und reduzierte Entladetiefen sowie das Zyklisieren bei einem Temperaturoptimum erlauben es, das Abgleiten in diese Nichtlinearität zu verzögern oder gänzlich zu verhindern. Durch Auswahl geeigneter SL-Anwendungen sowie optimaler Betriebsstrategien sollte es in der Praxis folglich gelingen, das Problem des nichtlinearen Alterns beherrschbar zu machen und eine ausreichende Betriebszeit in der SL-Anwendung sicherzustellen.

Zur Kostenreduktion ist auch zu erwägen, die Anforderungen der Wiederaufbereitung im Sinne eines „Design-for-Second-Life“ bereits bei der primären Batterie-Entwicklung zu berücksichtigen. Solche Standardisierungen sind erforderlich, um spezialisierten Unternehmen die Wiederaufbereitung von Batterien zu erleichtern.

Weil das wirtschaftliche Potenzial von SL-Lösungen stark vom Alterungsverhalten der Batterie abhängt, wurde ein detailliertes Ersatzschaltbild-basiertes Alterungsmodell verwendet und mit Messdaten einer typischen Fahrzeugbatterie parametriert. Dabei ergab sich für die verwendete Zellchemie (NMC) für das HSS ein mit ca. 3,5 % pro Jahr deutlich höherer Kapazitätsverlust als für die PRL-Bereitstellung mit ca. 0,8 % pro Jahr. Dieser deutliche Unterschied erklärt sich aus den tieferen und häufigeren (beinahe täglichen) Zyklen im HSS. Die höheren C-Raten in der PRL-Bereitstellung wirken sich aufgrund der flachen Zyklen um einen mittleren Ladezustand (SoC = 50 %) für den untersuchten Zelltyp hingegen nicht gravierend aus, das Alterungsverhalten wird hier nicht primär zyklisch, sondern kalendarisch bestimmt. Einschränkend muss gesagt werden, dass dieses Ersatzschaltbild-basierte Alterungsmodell auf einem spezifischen Alterungsdatensatz einer Lithium-Ionen-Zelle mit Graphit-Anode und NMC-Kathode beruht. NMC ist ein klassisches Kathodenmaterial für BEV-Zellen, aber im stationären Bereich unüblich. In Zukunft könnte dagegen das unterschiedliche Alterungsverhalten von gebrauchten LITB verschiedener Zellchemie das Einsatzpotenzial in SL-Anwendungen mitbestimmen.

Ausgehend vom Alterungsverhalten im Fahrzeugbetrieb wurde die Kostengrenze von SL-Batterien bzw. der maximale Restwert von LITB am Ende des „First Life“ berechnet. Eine wichtige Variable dabei ist der Neupreis von Batteriesystemen, der in Zukunft stark fallen soll. Für einen Übergabezeitpunkt bei 80 % Restkapazität ergab sich näherungsweise eine theoretische Kostengrenze von SL-Batterien von 50 % des zur gleichen Zeit anfallenden Neupreises. Von diesem Wert muss aber noch der Kostenaufwand der Wiederaufbereitung abgezogen werden, um auf den Restwert der gealterten LITB zu schließen. Aufgrund geringerer Anschaffungskosten sowie technischer Vorteile von SL-Batterien hat der Preis von Bleisäurebatterien als mögliche Konkurrenztechnologie keinen

Einfluss auf diese Kostengrenze. Auch die denkbare Reparatur defekter LITB wird SL-Konzepten keine Konkurrenz machen, da diese als ergänzende Maßnahme zu verstehen ist.

Angesichts steigender Rücklaufzahlen von gealterten LITB sowie weiterer Faktoren, wie z. B. steigenden Rohstoffpreisen, ist zukünftig auch von sinkenden Recyclingkosten auszugehen. Bleibt die Recyclingverpflichtung beim Hersteller, so könnte der Fahrzeughersteller sogar bei einem sehr geringen Restwert der gealterten LITB an einem Verkauf interessiert sein, sofern eine Kostenersparnis durch Recycling gegeben ist. Die Entwicklung von Recyclingkosten bzw. -erlösen wird daher den Restwert von SL-Batterien beeinflussen. Im Extremfall wäre der Akteur mit der Recyclingverpflichtung sogar bereit Geld an das aufbereitende Unternehmen zu zahlen.

Der Einsatz von SL-Batterien für die PRL-Bereitstellung kann unter den in dieser Studie getroffenen Annahmen den Kapitalwert der entsprechenden Investition um 33 % verbessern, der Einsatz von SL-Batterien in HSS um 26 %. Trotz dieser Kapitalwertsteigerung ist der HSS-Betrieb unter den angenommenen Parametern wirtschaftlich weiterhin mit Verlusten behaftet: Aufgrund der schnelleren Alterung betrachteter NMC-Batterien im HSS-Betrieb, muss eine SL-Batterie dort innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 20 Jahren mehrfach ausgetauscht werden. Auch ein größer dimensionierter Speicher würde die Wirtschaftlichkeit nicht steigern: Er würde zwar langsamer altern, aber von vorneherein mehr kosten.

Das Potenzial zur Reduktion der Total Cost of Ownership (TCO), das Besitzer von Elektrofahrzeugen durch den Verkauf ihrer Fahrzeugbatterie für SL-Anwendungen realisieren können, ist als sehr gering einzustufen. Es beläuft sich nach den Berechnungen dieser Studie auf etwa 3 % des Anschaffungspreises. Dies gilt für den Fall, dass die Batterie im Besitz des Fahrzeughalters ist und dieser die Batterie mit einem Restwert an den Fahrzeughersteller oder ein aufbereitendes Unternehmen veräußern kann.

Der potenzielle ökologische Vorteil von SL-Anwendungen ist groß. Sie können sowohl die mit der Batterieproduktion verbundenen Emissionen von Treibhausgasen (THG) und anderen schädlichen Stoffen als auch den Bedarf an knappen Ressourcen wie Nickel und Lithium senken. Unter den in dieser Studie gewählten Rahmenbedingungen konnte je kWh Nennkapazität der Traktionsbatterie ein THG-Einsparpotenzial von 34 bis 106 kg $CO_2$-Äquivalenten für die Bereitstellung von Primärregelleistung und von 30 bis 95 kg $CO_2$-Äquivalenten für den Einsatz als Hausspeichersystem bestimmt werden, wenn eine SL-Batterie tatsächlich eine Neubatterie substituiert. Wird durch die SL-Batterie dagegen eine zusätzliche Batteriespeicheranwendung geschaffen, dann hängt ihr ökologischer Nutzen von den Umweltwirkungen der jeweiligen Anwendung und den konkurrierenden Technologien ab.

# Anhang

# Danksagung

Wir bedanken uns beim Studienbeirat für die gute Zusammenarbeit, beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung und beim Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE) für die Betreuung während der Bearbeitung der Studie „Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen“. Ferner bedanken wir uns bei Alexander Zeh und Marcus Müller für die Bereitstellung von Lastprofilen eines zur Lieferung von Primärregelleistung eingesetzten Batteriespeichers. Bei Maik Naumann bedanken wir uns für die fachliche Beratung hinsichtlich eines wirtschaftlichen Einsatzes von Batteriespeichern in stationären Anwendungen. Ein weiteres Dankeschön geht an unsere studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter Charlotte Tardt, Michaela Blahusch und Nicolai Imbiel für ihre tatkräftige Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

# Abkürzungen/Glossar

**ÄVZ**
Äquivalenter Vollzyklus

**BattG**
Batteriegesetz

**BBK**
Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe

**BEV**
Batterieelektrisches Fahrzeug

**BMS**
Batteriemanagementsystem

**CCS**
Combined Charging System

**DoD**
Entladetiefe

**EE**
Erneuerbare Energien

**EEG**
Erneuerbare-Energien-Gesetz

**ENTSO-E**
European Network of Transmission System Operators for Electricity

**EoL**
End of Life

**Eo1L**
End of „First Life"

**Eo2L**
End of „Second Life"

**EV**
Elektrofahrzeug (Electric Vehicle)

**FFZ**
Flurförderzeuge

**HSS**
Hausspeichersystem

**ICEV**
Konventionelle Fahrzeuge (Internal Combustion Engine Vehicle)

**LFP**
Lithiumeisenphosphat

**LIB**
Lithium-Ionen-Batterien

**LITB**
Lithium-Ionen-Traktionsbatterie

**LIZ**
Lithium-Ionen-Zelle

**NEA**
Netzersatzanlagen

**NiMH-Batterien**
Nickelmetallhydridbatterien

**NMC**
Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid

**NPE**
Nationale Plattform für Elektromobilität

**Pb-Batterie**
Bleisäurebatterie

**PHEV**
Plug-In-Hybrid-Fahrzeug

**PRL**
Primärregelleistung

**PV**
Photovoltaik

**ROI**
Return on Investment

**SEI**
Solid Electrolyte Interphase

**SL**
Second-Life

**SLB**
Second-Life-Batterien

**SoC**
Ladezustand (State of Health)

**SoH**
State of Health

**SPI**
Solid Permeable Interphase

**TCO**
Total Cost of Ownership

**ÜNB**
Übertragungsnetzbetreiber

**USABC**
United States Advanced Battery Consortium

**USV**
Unterbrechungsfreie Stromversorgung

**xEV**
Elektrisch angetriebenes Fahrzeug (z. B. BEV, PHEV etc.)

**ZEV**
Zero Emissions Vehicle

# Literaturverzeichnis


**1. H. Vikström, S. Davidsson, M. Höök.** Lithium availability and future production outlooks. Applied Energy., 2013, 110, S. 252–266.

**2. E. Rahimzei, K. Sann, M. Vogel.** Kompendium: Li-Ionen-Batterien – Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. VDE Verband der Elektrotechnik. Frankfurt am Main, 2015.

**3. B.D. Williams, T.E. Lipman.** Strategies for transportation electric fuel implementation in California: Overcoming battery first-cost hurdles. California Energy Commission, PIER Transportation Program. s.l., 2010. CEC-500-2009-091.

**4. California Environmental Protection Agency.** Air Resources Board. [Online] 6. September 2015. http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevprog.htm.

**5. N. Pinsky.** Electric Vehicle Battery 2nd Use Study. Argonne National Laboratory. Argonne, Illinois, 1998.

**6. E. Cready, J. Lippert, J. Pihl, I. Weinstock, P. Symons, R.G. Jungst.** Technical and Economic Feasibility of Applying Used EV Batteries in Stationary Applications: A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. Sandia National Laboratories, United States Department of Energy. Albuquerque, Livermore, 2003. S. 77, Final Report SAND2002-4084.

**7. A. Burke.** Performance, Charging, and Second-use Considerations for Lithium Batteries for Plug-in Electric Vehicles. Institute of Transportation Studies, University of California. Davis, 2009. S. 23, Research Report UCD-ITS-RR-09-17.

**8. C.K. Narula, R. Martinez, O. Onar, M.R. Starke, G. Andrews.** Economic analyses of deploying used batteries in power systems. Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. Oak Ridge, 2011. S. 122, Final Report ORNL/TM-2011/151.

**9. B. Williams, T. Lipman.** Analysis of the combined vehicle- and post-vehicle-use value of lithium-ion plug-in-vehicle propulsion batteries. Task 3, Second life applications and value of „traction" lithium batteries. Transportation of Sustainability Research Center, University of California. Berkeley, 2011. S. 47, Final Report 500-02-004.

**10. H. Ambrose, D. Gershenson, A. Gershenson, D. Kammen**. Driving rural energy access: a second-life application for electric-vehicle batteries. Environmental Research Letters., 2014, 9, S. # 094004.

**11. J. Neubauer, A. Pesaran.** The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications. Journal of Power Sources., 2011, 196, S. 10351–10358.

**12. J.S. Neubauer, A. Pesaran, B. Williams, M. Ferry, J. Eyer**. A Techno-Economic Analysis of PEV Battery Second Use Repurposed-Battery Selling Price and Commercial and Indrustrial End-User Value. SAE International., 2012, # 2012-01-0349.

**13. R. Faria, P. Marques, R. Garcia, P. Moura, F. Freire, J. Delgado, A.T. de Almeida.** Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective. Journal of Power Sources. 2014, 262, S. 169–177.

**14. R. Sathre, C.D. Scown, O. Kavvada, T.P. Hendrickson.** Energy and climate effects of second-life use of electric vehicle batteries in California through 2050. Journal of Power Sources. 2015, 288, S. 82–91.

**15. L. Ahmadi, A. Yip, M. Fowler, S. Young, R. Fraser**. Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2014, 6, S. 64–74.

**16. K. Genikomsakis, C. Ioakimidis, A. Murillo, A. Trifonova, D. Simic.** A Life Cycle Assessment of a Li-ion urban electric vehicle battery. Barcelona: EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, 2013.

**17. D. Kim, A. Geissler, C. Menn, D. Hengevoss.** Quantifizierung des Umweltnutzens von gebrauchten Batterien aus Elektrofahrzeugen als gebäudeintegrierte 2nd-Life-Stromspeichersysteme. Bauphysik. 2015, 37.

**18. J. Neubauer, K. Smith, E. Wood, A. Pesaran.** Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries. National Renewable Energy Laboratory. Golden: s. n., 2015. NREL/TP-5400-63332.

**19. M. Bowler, J. Weber, D. Bodde, J. Taiber, T. Kurfess.** Battery second use: Sustainable life cycle design through the extension of tools used in the vehicle development process. Ingolstadt: s. n., 2013. 5th International Conference on Sustainable Automotive Technologies (ICSAT).

**20. E.N. Elkind, S. Hecht, C. Horowitz, S. Weissman.** REUSE AND REPOWER – How to Save Money and Clean the Grid with Second-Life Electric Vehicle Batteries. CLEE (Berkeley Law), Emmett Institute (UCLA). California: s. n., 2014. Final Report.

**21. D. Beverungen, C. Fabry, W. Ganz, M. Matzner, G. Satzger.** Dienstleistungsinnovationen für Elektromobilität. Aachen, Karlsruhe, Münster, Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 2015. S. 185.

**22. J. Warner.** The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design. 9780128014561 ISBN Print Book. s.l.: Elsevier Science, 2015. Bd. 1st Edition.

**23. EUWID (Europäischer Wirtschaftsdienst).** EUWID – NEUE ENERGIE. [Online] 6. September 2015. http://www.euwid-energie.de/news/systemtransformation/einzelansicht/Artikel/second-life-batteries-bosch-bmw-und-vattenfall-starten-speicherprojekt.html.

**24. heise Autos.** heise online. [Online] 26. Oktober 2015. [Zitat vom: 18. November 2015.] http://www.heise.de/autos/artikel/Joint-Venture-baut-Speicher-aus-gebrauchten-E-Auto-Akkus-2854938.html.

**25. S.J. Tong, A. Same, M.A. Kootstra, J.W. Park.** Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: An experimental and numerical investigation. Applied Energy. 2013, 104, S. 740–750.

**26. Forsee Power.** Forsee Power – Designing Tomorrow. [Online] Juli 2015. http://www.forseepower.fr/wp-content/uploads/2015/07/10072015_2nd-Life-Project_DE.pdf.

**27. H. Steininger.** Die SWOT-Analyse. Dresden: edditrex coop., 2003.

**28. W. Mauch, et al.** Modellregion Elektromobilität München – Szenarien für das Potenzial an Elektrofahrzeugen im Münchner Individualverkehr bis 2030. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), 2010.

**29. J. Michaelis, J. Junker,M. Wietschel.** Eine Bewertung der Regelenergievermarktung im Power-to-Gas-Konzept. [Hrsg.] Springer Fachmedien. Zeitschrift für Energiewirtschaft. 2013, 37.

**30. W. Mauch, P. Nobis, C. Pellinger, T. Staudacher.** eFlott – Wissenschaftliche Analysen zur Elektromobilität. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE), 2011.

**31. Nationale Plattform Elektromobilität (NPE).** Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), 2011.

**32. Shell Deutschland Oil GmbH.** Shell PKW-Szenarien bis 2030 – Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität. Hamburg: Shell, 2009.

**33. W. Zimmer, M. Buchert, S. Dittrich, F. Hacker, R. Harthan,H. Hermann, W. Jenseit, P. Kasten, C. Loreck, K. Götz, G. Sunderer, B. Birzle-Harder, J. Deffner.** OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen – Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft. Berlin: Öko-Institut e. V.; Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE), 2011.

**34. P. Plötz, T. Gnann, A. Kühn, M. Wietschel.** Markthochlaufszenarien für Elektrofahrzeuge – Langfassung. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe, 2013.

**35. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).** Fahrzeugzulassungen (FZ) – Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. Flensburg: KBA, 2013.

**36. C. Pellinger, T. Schmid.** Laufendes Projekt: Merit-Order der Energiespeicherung im Jahr 2030. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2012.

**37. Argonne National Laboratory.** Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles. US Department of Energy. Illinois: s. n., 2012.

**38. M. Lowe, S. Tokuoka, G. Gereffi, T. Trigg.** Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: The U.S. Value Chain. Durham: Duke University, 2010.

**39. G. Klink, S. Krubasik, T. Rings, M. Schindler.** Überspannung im Batteriemarkt für Elektrofahrzeuge. Düsseldorf: A.T. Kearney GmbH, 2012.

**40. J. Richter, D. Lindenberger.** Potenziale der Elektromobilität bis 2050 – Eine szenarienbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration. Energiewirtschaftliches Institut (ewi) an der Universität Köln. Köln, 2010. S. 142, Endbericht.

**41. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO).** Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Berlin, 2011.

**42. C. Cluzel, C. Douglas.** Cost and performance of EV batteries. Element Energy Limited. Cambridge, 2013.

**43. B. Nykvist, et al.** Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. [Hrsg.] Nature Publishing Group. Nature Climate Change. 2015.

**44. Kraftfahrt-Bundesamt.** http://www.kba.de/. [Online] [Zitat vom: 01.08.2015.] http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Ausserbetriebsetzungen/Umwelt/2014_a_umwelt_dusl_absolut.html?nn=664484.

**45. M. Kassem, J. Bernard, R. Revel, S. Pélissier, F. Duclaud, C. Delacourt.** Calendar aging of a graphite/LiFePO4 cell. Journal of Power Sources. Februar 2012, 208, S. 296–305.

**46. P. Balbueana, Y. Wang.** Lithium-Ion Batteries – Solid-Electrolyte Interphase. London: World Scientific Pub Co, 2004.

**47. V. Agubra, J. Fergus.** Lithium Ion Battery Anode Aging Mechanisms. Materials. 2013, 6, S. 1310–1325.

**48. J. Vetter, P. Novák, M.R. Wagner, C. Veit, K.-C. Möller, J.O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, A. Hammouche.** Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. Journal of Power Sources. 2005, 147, S. 269–281.

**49. S. Kim,** A.C.T. van Duin, V.B. Shenoy. Effect of electrolytes on the structure and evolution of the solid electrolyte interphase in Li-ion batteries: A molecular dynamics study. Journal of Power Sources. 2011, 196, S. 8590–8597.

**50. M. Broussely, P. Biensan, F. Bonhomme, P. Blanchard, S. Herreyre, K. Nechev, R. J. Staniewicz.** Main aging mechanisms in Li ion batteries. Journal of Power Sources. 2005, 146, S. 90–96.

**51. H.J. Ploehn, P. Ramadass, R.E. White.** Solvent Diffusion Model for Aging of Lithium-ion Battery Cells. Journal of The Electrochemical Society. 2004, Volume 151, Issue 3, S. A456–A462.

**52. P. Röder, B. Stiaszny, J. Ziegler, N. Baba, P. Lagaly, H. Wiemhöfer.** The impact of calendar aging on the thermal stability of a LiMn2O4-Li(Ni1/3Mn1/3Co1/3)O2/graphite lithium-ion cell. Journal of Power Sources. 2014, 268, S. 315–325.

**53. E. Sarasketa-Zabala, I. Gandiaga, L. Rodriguez-Martinez, I. Villarreal.** Calendar ageing analysis of a LiFePO4/graphite cell with dynamic model validations: Towards realistic lifetime predictions. Journal of Power Sources. 2014, 272, S. 45–47.

**54. M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, J. Garche.** Aging mechanisms of lithium cathode materials. Journal of Power Sources. 2004, 127, S. 58–64.

**55. J. Choi, A. Manthiram.** Role of Chemical and Structural Stabilities on the Electrochemical Properties of Layered LiNi1/3Mn1/3Co1/3O2 Cathodes. Journal of The Electrochemical Society. 2005, Volume 152, Issue 9, S. A1714–A1718.

**56. S. Grolleau, A. Delaille, H. Gualous, P. Gyan, R. Revel, J. Bernard, E. Redondo-Iglesias, J. Peter.** Calendar aging of commercial graphite/LiFePO4 cell - Predicting capacity fade under time dependent storage conditions. Journal of Power Sources. 2014, 255, S. 450–458.

**57. B. Stiaszny, J.C. Ziegler, E.E. Krauß, M. Zhang, J.P. Schmidt, E. Ivers-Tiffée.** Electrochemical characterization and post-mortem analysis of aged LiMn2O4-NMC/graphite lithium ion batteries part II: Calendar aging. Journal of Power Sources. 2014, 258, S. 61–75.

**58. J. Wang, Y. Tang, J. Yang, R. Li, G. Liang, X. Sun.** Nature of LiFePO4 aging process: Roles of impurity phases. Journal of Power Sources. 2013, 238, S. 454–463.

**59. T. Waldmann, M. Wilka, M. Kasper, M. Fleischhammer, M. Wohlfahrt-Mehrens.** Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries – A Post-Mortem study. Journal of Power Sources. 2014, 262, S. 129–135.

**60. L. Bodenes, R. Naturel, H. Martinez, R. Dedryvère, M. Menetrier, L. Croguennec, J. Pérès, C. Tessier, F. Fischer.** Lithium secondary batteries working at very high temperature: Capacity fade and understanding of aging mechanisms. Journal of Power Sources. 2013, 236, S. 265–275.

**61. J. C. Burns, A. Kassam, N.N. Sinha, L.E. Downie, L. Solnickova, B. M. Way, J. R. Dahn**. Predicting and Extending the Lifetime of Li-ion Batteries. Journal of The Electrochemical Society. Juli 2013, Volume 160, Issue 9, S. A1451–A1456.

**62. M. Klett, R. Eriksson, J. Groot, P. Svens, K. C. Högström, R.W. Lindström, H. Berg, T. Gustafson, G. Lindbergh, K. Edström.** Non-uniform aging of cycled commercial LiFePO4//graphite cylindrical cells revealed by post-mortem analysis. Journal of Power Sources. 2014, 257, S. 126–137.

**63. M. Ecker, N. Nieto, S. Käbitz, J. Schmalstieg, H. Blanke, A. Warnecke, D.U. Sauer**. Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O2 based 18650 lithium-ion batteries. Journal of Power Sources. 2014, 248, S. 839–851.

**64. J. Wang, J. Purewal, P. Liu, J. Hicks-Garner, S. Soukazian, E. Sherman, A. Sorenson, L. Vu, H. Tataria, M.W. Verbrugge**. Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel-cobalt-manganese oxide + spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation. Journal of Power Sources. 2014, 269, S. 937–948.

**65. T. Ohzuku, Y. Iwakoshi, K. Sawai.** Formation of Lithium-Graphite Intercalation Compounds in Nonaqueous Electrolytes and Their Application as a Negative Electrode for a Lithium Ion (Shuttlecock) Cell. Journal of The Electrochemical Society. 1993, Volume 140, Issue 9, S. 2490–2498.

**66. W.H. Woodford, W.C. Carter, Y. Chiang**. Design criteria for electrochemical shock resistant battery electrodes. Energy & Environmental Science. 2012, 5, S. 8014–8024.

**67. W. Yoon, K.Y. Chung, J. McBreen, X. Yang**. A comparative study on structural changes of LiCo1/3Ni1/3Mn1/3O2 and LiNi0.8Co0.15Al0.05O2 during first charge using in situ XRD. Electrochemistry Communications. 2006, 8, S. 1257–1262.

**68. B. Bitzer, A. Gruhle.** A new method for detecting lithium plating by measuring the cell thickness. Journal of Power Sources. 2014, 262, S. 297–302.

**69. M. Fleischhammer, T. Waldmann, G. Bisle, B. Hogg, M. Wohlfahrt-Mehrens.** Interaction of cyclic ageing at high-rate and low temperatures and safety in lithium-ion batteries. Journal of Power Sources. 2015, 274, S. 432439.

**70. J. Schmalstieg, S. Käbitz, M. Ecker, D.U. Sauer.** A holistic aging model for Li(NiMnCo)O2 based 18650 lithium-ion batteries. Journal of Power Sources. 2014, 257, S. 325–334.

**71. M.B. Pinson, M.Z. Bazant.** Theory of SEI Formation in Rechargeable Batteries: Capacity Fade, Accelerated Aging and Lifetime Prediction. Journal of The Electrochemical Society. 2013, Volume 160, Issue 2, S. A243-A250.

**72. K. Smith, J. Neubauer, E. Wood, M. Jun, A. Pesaran.** Models for battery reliability and lifetime – Applications in design and health management. National Renewable Laboratory Website. [Online] April 2013. http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58550.pdf.

**73. D.A. Stevens, R.Y. Ying, R. Fathi, J.N. Reimers, J.E. Harlow, J.R. Dahn.** Using High Precision Coulometry Measurements to Compare the Degradation Mechanisms of NMC/LMO and NMC-Only Automotive Scale Pouch Cells. Journal of The Electrochemical Society. 2014, Volume 161, Issue 9, S. A1364–A1370.

**74. T. Baumhöfer, M. Brühl, S. Rothgang, D.U. Sauer.** Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance. Journal of Power Sources. 2014, 247, S. 332338.

**75. M. Dubarry, C. Truchot, M. Cugnet, B.Y. Liaw, K. Gering, S. Sazhin, D. Jamison, C. Michelbacher.** Evaluation of commercial lithium-ion cells based on composite positive electrode for plug-in hybrid electric vehicle applications. Part I: Initial characterization. **Journal of Power Sources**. 2011, 196, S. 10328–10335.

**76. S.F. Schuster, T. Bach, E. Fleder, J. Müller, M. Brand, G. Sextl, A. Jossen.** Nonlinear aging characteristics of lithium-ion cells under different operational conditions. Journal of Energy Storage. 2015, 1, S. 44–53.

**77. E. Wood, M. Alexander, T.H. Bradley.** Investigation of battery end-of-life conditions for plug-in hybrid vehicles. Journal of Power Sources. 2011, 11, S. 5147-5154.

**78. B. Lunz, Z. Yan, J.B. Gerschler, D.U. Sauer.** Influence of plug-in hybrid electric vehicle charging strategies on charging and battery degradation costs. Energy Policy. 2012, 46, S. 511–519.

**79. J. Neubauer, A. Brooker, E. Wood.** Sensitivity of plug-in hybrid electric vehicle economics to drive patterns, electric range, energy management, and charge strategies. Journal of Power Sources. 2013, 236, S. 357–364.

**80. C. Heymans, S.B. Walker, S.B. Young, M. Fowler.** Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-levelling. Energy Policy. 2014, 71, S. 22–30.

**81. S. Saxena, C. Le Floch, J. MacDonald, S. Moura.** Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models. Journal of Power Sources. 2015, 282, S. 265–276.

**82. B. Williams, T. Lipman.** Analysis of the Combined Vehicle- and Post-Vehicle-Use Value of Lithium-Ion Plug-In-Vehicle Propulsion Batteries. California Energy Commission. 2012. Report CEC-500-2013-088.

**83. E. Musk.** http://www.teslamotors.com. [Online] 15. 8 2014. http://www.teslamotors.com/blog/infinite-mile-warranty.

**84. C.T. Love, M.B.V. Virji, R. E. Rocheleau, K.E. Swider-Lyons.** State-of-health monitoring of 18650 4S packs with a single-point impedance diagnostic. Journal of Power Sources. 2014, 266, S. 512–519.

**85. D. Paul, T. Kabza.** Analysis of ageing inhomogeneities in lithium-ion battery systems. Journal of Power Sources. Januar 2013, 239, S. 642–650.

**86. Y. Zheng, M. Ouyang, L. Lu, J. Li.** Understanding aging mechanisms in lithium-ion battery packs: From cell capacity loss to pack capacity evolution. Journal of Power Sources. 2015, 278, S. 287–295.

**87. M. Dubarry, C. Truchot, A. Devie, B.Y. Liaw.** State-of-Charge Determination in Lithium-Ion Battery Packs Based on Two-Point Measurements in Life. Journal of The Electrochemical Society. 2015, 162, S. A877–A884.

**88. M. Dubarry, N. Vuillaume, B.Y. Liaw.** Origins and accomodation of cell variations in Li-ion battery pack modeling. International Journal of Energy Research. 2010, 34, S. 216–231.

**89. S. Santhanagopalan, R.E. White.** Quantifying Cell-to-Cell Variations in Lithium Ion Batteries. International Journal of the Electrochemistry. 2011, Volume 2012, Article ID 395838, S. 1–10.

**90. B. Kenney, K. Darcovich, D.D. MacNeil, I.J. Davidson.** Modelling the impact of variations in electrode manufacturing on lithium-ion battery modules. Journal of Power Sources. 2012, 213, S. 391–401.

**91. S.F. Schuster, M.J. Brand, P. Berg, M. Gleissenberger, A. Jossen.** Lithium-ion cell-to-cell variation during battery electric vehicle operation. Journal of Power Sources. 2015, 297, S. 242–251.

**92. S.M. Rezvanizaniani, Z. Liu, Y. Chen, J. Lee.** Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. Journal of Power Sources. 2014, 256, S. 110–124.

**93. M.J. Brand, S.F. Schuster, T. Bach, E. Fleder, M. Stelz, S. Gläser, J. Müller, G. Sextl, A. Jossen.** Effects of vibrations and shocks on lithium-ion cells. Journal of Power Sources. 2015, 288, S. 62–69.

**94. K. Ridder, J. Holzhäuser.** ADR 2015. 30. Auflage. Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg: ecomed – Storck GmbH, 2014. Bde. ISBN-13: 978-3609697147.

**95. K. Takeno, M. Ichimura, K. Takano, J. Yamaki, S. Okada.** Quick testing of batteries in lithium-ion battery packs with impedance-measuring technology. Journal of Power Sources. 2004, 128, S. 67–75.

**96. H. Dong, X. Jin, Y. Lou, C. Wang.** Lithium-ion battery state of health monitoring and remaining useful life prediction based on support vector regression-particle filter. Journal of Power Sources. 2014, 271, S. 114–123.

**97. S.F. Schuster, M.J. Brand, C. Campestrini, M. Gleissenberger, A. Jossen.** Correlation between capacity and impedance of lithium-ion cells during calendar and cycle life. Brüssel: s. n., Dezember 2015. European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress (EEVC 2015).

**98. Macrom Marketingresearch & Consult.** Der deutsche Markt für Industriebatterien 2010. Hamburg: Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS), 2010.

**99. K. Wachinger, C. Pellinger, R. Janssen.** Anwendungsfälle für Hausspeicher – ein Blick über den Tellerrand. [Hrsg.] etv Energieverlag GmbH. Energiewirtschaftliche Tagesfragen. 64. Jg., 2014, Heft 12.

**100. K. Wachinger, C. Pellinger.** Hausspeicher 2.0. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2014.

**101. Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB).** Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung. [Online] 2015. www.regelleistung.net.

**102. Verband der Netzbetreiber e. V. (VDN) beim VDEW.** TransmissionCode 2007 – Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Berlin: VDN, 2007.

**103. Bundesnetzagentur (BNetzA).** Festlegungsverfahren zu den Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Primärregelleistung – Az: BK6-10-097. Bonn: BNetzA, 2011.

**104. Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB).** Anforderungen an die Speicherkapazität bei Batterien für die Primärregelleistung. Berlin: s. n., 2015.

**105.** —. Ausschreibungsplattform Regelenergie (Daten verschiedener Jahre). [Online] 2015. https://www.regelleistung.net/.

**106. S. Gerhard (Vattenfall Europe Innovation GmbH).** Diskussion zum Projekt Second Life Batteries. Hamburg, 2015.

**107. S. Gerhard, A. Kohler und S. Saatmann.** Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen stationärer Batteriespeicher im Verteilnetz. Hamburg: Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), 2014.

**108. Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB).** Eckpunkte und Freiheitsgrade bei Erbringung von Primärregelleistung – Leitfaden für Anbieter von Primärregelleistung. [Online] 2014. https://www.regelleistung.net/ip/action/static/prequal.

**109. S. Gerhard, F. Halfmann.** Entwurf einer Betriebsstrategie für Batteriespeicher zur Teilnahme am Primärregelleistungsmarkt. Hamburg: Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), 2014.

**110. Younicos AG.** Batteriekraftwerk Schwerin. [Online] 2014. http://www.younicos.com/download/Younicos_Referenzprojekt_Schwerin.pdf.

**111. M. Müller, A. Jossen.** Research Project – EEBatt – Distributed stationary battery storage systems for the efficient use of renewable energies and support of grid stability. Berlin: Batterieforum Deutschland, 2015.

**112. M. Müller, A. Zeh, S. Rohr, S.F. Schuster, C. Campestrini, H.C. Hesse, R. Witzmann, M. Lienkamp, A. Jossen.** Evaluation of the aging behaviour of stationary lithium-ion battery storage systems for different pholtovoltaic-driven applications in low voltage grids. Hamburg: European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2015), September 2015.

**113. S. Wilkinson.** Residential Solar Energy Storage Market to Grow by Factor of 10 from 2014 to 2018. [Online] 2014. https://technology.ihs.com/515746/residential-solar-energy-storage-market-to-grow-by-factor-of-10-from-2014-to-2018.

**114. D.U. Sauer, K.-P. Kairies.** Aktuelle Ergebnisse der Begleitforschung zum KfW-Förderprogramm für PV-Speicher – Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende. Berlin: Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW Berlin), 2015.

**115. J. Mayer**. Solarstromspeicher in Deutschland - Marktüberblick - Förderprogramm. Berlin: Bundesverband Solarwirtschaft e. V. (BSW), 2014.

**116. Bundesverband Solarwirtschaft e. V. (BSW).** Lithium-Ionen-Hausspeicher Sicherheitsaspekte. Berlin: BSW, 2015.

**117. P. Nobis, S. Fischhaber, J. Habermann, F. Samweber.** e-GAP – Modellkommune Elektromobilität Garmisch-Partenkirchen. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE), 2012.

**118. I. Frenzel, J. Jarass, S. Trommer, B. Lenz.** Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland – Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung. Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), 2015.

**119. J.S.Wörsdorfer, W. Kaus.** Will imitators follow pioneer consumers in the adoption of solar thermal systems? Empirical evidence for North-West Germany. [Hrsg.] Max-Planck-Institut für Ökonomik. Papers on economics and evolution. 1013, 2010.

**120. J. Kaenzig, R. Wüstenhagen.** Understanding the Green Energy Consumer. [Hrsg.] Universität St. Gallen. Marketing Review St. Gallen. 2008, 4.

**121. G. Muttenthaler.** USV-Klassifizierung nach IEC 62040-3. Wien: Mess- und Stromversorgungstechnik e. U. (MTM), 2015.

**122. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK).** Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden. Bonn: BBK, 2015. Bd. Praxis im Bevölkerungsschutz Band 13.

**123. H. Derenthal.** USV: Höhere Netz- und Signalqualität steigert Anlagenverfügbarkeit. [Hrsg.] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. etz. 2011, 1–2.

**124. C. Lauwig.** PROSA – Unterbrechungsfreie Stromversorgungen für Notstromaggregate – Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen. Berlin, Heidelberg: Öko-Institut e. V., 2013.

**125. SAFT Power Systems.** Klassifizierung der USV nach ihrem Betriebsverhalten. Frankfurt: Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE), 2002.

**126. S. von Roon, T. Buber.** Versorgungsqualität und -zuverlässigkeit als Standortfaktor – Vortrag bei der FfE-Fachtagung am 30. April 2013. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2013.

**127. multimatic Vertriebs GmbH.** USV-Technologien. [Online] 2015. http://www.multimatic-usv.de/produkte/know-how/usv-technologien.html.

**128. IGN GmbH.** Hochverfügbarkeits-Rechenzentrum der IGN GmbH - Fact Sheet. München: IGN GmbH, 2012.

**129. F. Lampe.** Green-IT, Virtualisierung und Thin Clients – Mit neuen IT-Technologien Energieeffizienz erreichen, die Umwelt schonen und Kosten sparen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.

**130. ABB AG.** ABB USV Systeme Innovation und Qualität 1 kVA bis 5 MVA. Zürich: ABB AG, 2015.

**131. Bundesnetzagentur (BNetzA).** Versorgungsqualität – SAIDI-Werte 2006-2014. [Online] 2015. http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1931/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/Versorgungsqualit%C3%A4t/Versorgungsqualit%C3%A4t-node.html.

**132. H. Kiank, W. Fruth.** Planungsleitfaden für Energieverteilungsanlagen - Konzeption, Umsetzung und Betrieb von Industrienetzen. Berlin und München: Siemens AG, 2011.

**133. Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN).** Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität in Deutschland – Fakten. Berlin: FNN, 2013.

**134. EPS Rechenzentrum Infrastruktur GmbH.** Merkmale und Vorteile der IT Notstromversorgungslösungen, Dieselaggregaten von EPS Electric Power Systems GmbH. [Online] 2015. http://www.it-usv.de/Diesel_Aggregate/Diesel_Aggregat_SDMO_40kVA.html.

**135. Dr. med. K. Hanger.** Volt – Notstromaggregat, Krankenhaus. [Online] 2011. http://www.mtu-report.com/de-de/Energie/Dieselaggregate/Dr-med-Volt.

**136. Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG).** Unfallverhütungsvorschrift BGV D27 Flurförderzeuge vom 1. Juli 1995 in der Fassung vom 1. Januar 1997 mit Durchführungsanweisungen vom Januar 2002 - § 2 BGV D27. [Online] 2010. https://www.vbg.de/apl/uvv/36/2.htm.

**137. Berufsgenossenschaft für Handel und Warenlogistik (BGHW).** Einsatz von Flurförderzeugen – Batterieladeanlagen für Flurförderzeuge. Bonn: BGHW, 2008.

**138. dhf Infralogistik.** World Ranking List of Material Handling Vehicles 2013/2014. Ludwigsburg: AGT Verlag Thum GmbH, 2014.

**139. H. G. Frey, V. Hues.** Bilanzpressekonferenz. Hamburg: Jungheinrich AG, 2014.

**140. R. Mannel**. Verbrennungsmotor – vergleichbare Leistung und umweltschonender Betrieb – Drehstromantriebe revolutionieren Elektrostapler. [Online] 2015. http://www.beschaffung-aktuell.de/home/-/article/16537505/26952342/Verbrennungsmotor-vergleichbare-Leistung-und-umweltschonender%0ABetrieb/art_co_INSTANCE_0000/maximized/.

**141. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI).** Einsatz von Zellen der Europabaureihe in DIN-Batterien. Frankfurt am Main: ZVEI, 2004.

**142.** —. Normen und Richtlinien für Blei-Antriebsbatterien. Frankfurt am Main: ZVEI, 1998.

**143. Jungheinrich AG.** EFG 213/215/216k/216/218k/218/220 - Elektro-Dreiradstapler (1.300/1.500/1.600/1.800/2.000 kg). Hamburg: Jungheinrich AG, 2014.

**144.** —. Effiziente Stapelei – Produkttest: E-Stapler bis 1,6 Tonnen. Hamburg: Jungheinrich AG, 2011.

**145.** Analyse der Wechselwirkungen zwischen Gebäude, Haustechnik und Intralogistik zur Steigerung der Energieeffizienz von Logistikzentren. **J. Freis.** München: Technische Universität München (TUM), 2013. Magdeburger Logistiktage „Sichere und nachhaltige Logistik". Bd. Tagungsband 18.

**146. T. Hamacher, R. Dornmair, D. Atabay, F. Keller, G. Reinhart.** Flexibilisierung des Stromverbrauchs in Fabriken – Vortrag auf dem 13. Symposium Energieinnovation Graz. Graz: TU Graz, 2014.

**147. J. Eyer, G. Corey.** Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide – A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. California: Sandia National Laboratories, 2010.

**148. A. Kampker, A. Schnettler, D. Vallée.** Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.

**149. Nationale Plattform Elektromobilität (NPE).** Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung. Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), 2014.

**150. Kiefermedia GmbH**. Schnelles Laden ermüdet die Batterie vorzeitig. [Online] 2015. http://www.batteriezukunft.de/nutzen/schnellladen.

**151. BMW AG.** Der BMWi3 – Preisliste. München: BMW AG, 2015.

**152. C. Campestrini, S.F. Schuster, R.C. Karl, C. Ni, A. Jossen.** Equivalent circuit based modelling and prediction of the ageing behaviour of lithium-ion cells. Brüssel: European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress (EEVC 2015), Dezember 2015. European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress.

**153. C. Guenther, M. Taumann, J. Li, M.A. Danzer.** Calculation of the Residual Value of Used Electric Vehicle Batteries for Stationary Second Life Applications. Mainz, January 2015. European Advanced Automotive & Stationary Battery Conference.

**154. T. Uno.** Influence of high-frequency charge-discharge cycling induced by cell voltage equalizers on the life performance of lithium-ion cell. IEEE Transactions on vehicular technology. Mai 2011, 60, S. 1505–1515.

**155. K. Kairies, D. Haberschusz, D. Magnor, M. Leuthold, J. Badeda, D.U. Sauer.** Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher. Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (iSEA) der RWTH Aachen. 2015. Jahresbericht 2015.

**156. B. Battke, T.S. Schmidt, D. Grosspietsch, V.H. Hoffm**ann. A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013, 25, S. 240–250.

**157.** Batteriegesetz vom 25. Juni 2009 (BGBl. I S. 1582), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist. Berlin: Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV), 2009.

**158. A. Kwade, G. Bärwaldt.** LithoRec – Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Recycling von Lithium-Ionen-Batterien im Rahmen des FuE-Programms „Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität". Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2012.

**159. C. Hoyer.** Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.

**160. D.C.R. Espinosa, A.M. Bernardes, J.A.S. Tenório.** An overview on the current processes for the recycling of batteries. Journal of Power Sources., 2004, 135, S. 311–319.

**161. L. Gaines, R. Cuenca.** Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles. Argonne National Laboratory. Chicago: s. n., 2000. S. 58, ANL/ESD-42.

**162.** Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS). Entsorgungskostenbeiträge für Gerätebatterien. Hamburg: GRS, 2015.

**163. M. Gellner, L. Wuschke, H. Jäckel, U.A. Peuker.** Akkus mechanisch aufbereiten. RECYCLING magazin. 2015, 16, S. 26–29.

**164.** Altfahrzeug-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juni 2002 (BGBl. I S. 2214), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 5. Dezember 2013 (BGBl. I S. 4043) geändert worden ist. Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2002.

**165.** Einführungsgesetz zum Handelsgesetzbuch in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 4101-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das durch Artikel 2 des Gesetzes vom 28. Juli 2015 (BGBl. I S. 1400) geändert worden ist. Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV), 2015.

**166. Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW).** KfW-Programm Erneuerbare Energien „Speicher" – Merkblatt für Beratungsförder. Frankfurt/Main: s. n., 2014.

**167. P. Konstantin.** Praxisbuch Energiewirtschaft – Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. Stuttgart: Springer-Verlag, 2008.

**168. M. Naumann.** Lithium-ion Battery Cost Analysis in PV-household Application. Energy Procedia. 73, 2015.

**169. European Energy Exchange AG (EEX).** Marktdaten verschiedener Jahre. [Online] 2015. http://www.transparency.eex.com/de/.

**170. C. Lorenz, G. Schröder.** Wirtschaftlichkeit Batteriespeicher – Berechnung der Speicherkosten und Darstellung der Wirtschaftlichkeit ausgewählter Batterie-Speichersysteme. Werlte: Redpoint Solar GmbH, 2014.

**171. F. Samweber, P. Nobis, S. Fischhaber.** Sun2Car@GAP – Eigenverbrauch von Photovoltaikenergie mit Elektrofahrzeugen. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE), 2013.

**172. T. Staudacher, S. Eller.** Dezentrale Stromversorgung eines Einfamilienhauses. [Hrsg.] Verein Deutscher Ingenieure (VDI). BWK. 2012, Ausgabe 6.

**173. Öko-Institut e. V.** Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen – Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher $CO_2$-Minderung. Berlin: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2015.

**174. B. Klör, D. Beverungen, S. Bräuer, F. Plenter, M. Monhof.** A Market for Trading Used Electric Vehicle Batteries – Theoretical Foundations and Information Systems. ECIS 2015 Completed Research Papers. Paper 105. 2015.

**175. M. Ritthoff, K. Schallaböck.** Ökobilanzierung der Elektromobilität. Themen und Stand der Forschung – Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität". Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie, 2012.

**176. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (WI).** Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität (STROMbegleitung) – Abschlussbericht im Rahmen der Förderung des Themenfeldes „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)" an das BMBF. Stuttgart, Wuppertal, Berlin: DLR, WI, BMBF, 2015.

**177. T. Hettesheimer, T. Hummen, F. Marscheider-Weidemann, M. Schröter, C. Lerch, M. Stahlberger, A. Heussler.** Energiespeicher Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR) – Bericht zur Produktion und Ökobilanzierung. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013.

**178. H.-J. Althaus, C. Bauer.** Gegenüberstellung verschiedener aktueller Schweizer Ökobilanzstudien im Bereich Elektromobilität. Villigen, Dübendorf: Empa, 2011.

**179. D. Notter, M. Gauch, R. Widmer, P. Wäger, A. Stamp, R. Zah, H.-J. Althaus.** Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. Environmental Science & Technology. 2010, 44, S. 6550–6556.

**180. A. Regett, C. Heller.** Relevanz zeitlich aufgelöster Emissionsfaktoren für die Bewertung tages- und jahreszeitlich schwankender Verbraucher. Energiewirtschaftliche Tagesfragen. 2015, 70.

**181. D. Notter, M. Gauch, R. Widmer, P. Wäger, A. Stamp, R. Zah, H.-J. Althaus.** Supporting Information to the manuscript entitled – Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. Dübendorf: Empa, 2010.

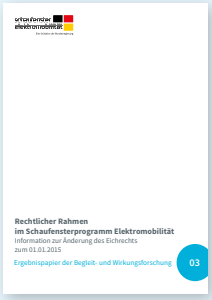
**182. ETH, Agroscope, Empa, EPFL, PSI.** The ecoinvent database, Version 3. Zürich: ecoinvent, 2015.

**183. European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E).** Explanation of FCR Energy Requirement for CE and NE as Defined in NC LFCR. Brüssel: ENTSO-E, 2013.

# Ergebnispapiere der BuW

**Ergebnispapier Nr. 01**
Wer sind die Nutzerinnen und Nutzer von Elektromobilität? Transparenz durch das Nutzer-Begriffsnetz und den Nutzercube

**Ergebnispapier Nr. 02**
Microgrids und Elektromobilität in der Praxis: Wie Elektroautos das Stromnetz stabilisieren können




**Ergebnispapier Nr. 03**
Rechtlicher Rahmen im Schaufensterprogramm Elektromobilität. Information zur Änderung des Eichrechts zum 01.01.2015

**Ergebnispapier Nr. 04**
Übersicht Rechtlicher Rahmen im Schaufensterprogramm Elektromobilität für den Ressortkreis (unveröffentlicht)

**Ergebnispapier Nr. 05**
Good E-Roaming Practice. Praktischer Leitfaden zur Ladeinfrastruktur-Vernetzung in den Schaufenstern Elektromobilität (Deutsch und Englisch)

**Ergebnispapier Nr. 06**
Fragen rund um das Elektrofahrzeug: Wie kommen die Angaben über den Stromverbrauch und die Reichweite von Elektrofahrzeugen zustande?

**Ergebnispapier Nr. 07**
Zwischenwertung und Fortsetzungsempfehlung zum Schaufensterprogramm für den Ressortkreis (unveröffentlicht)

**Ergebnispapier Nr. 08**
Elektromobilität im Autohaus – Praktischer Leitfaden für Autohändler zum Vertrieb von Elektrofahrzeugen

**Ergebnispapier Nr. 09**
Online-Befragung – Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen

**Ergebnispapier Nr. 13**
Urbane Mobilitätskonzepte im Wandel – erleben und erfahren
(in Vorbereitung)

**Ergebnispapier Nr. 10**
Online-Befragung – Umfrage unter elektromobilitätsinteressierten Personen zu Pro und Contra Anschaffung von Elektrofahrzeugen

**Ergebnispapier Nr. 14**
Betreiber- und Finanzierungsmodelle öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur
(in Vorbereitung)

**Ergebnispapier Nr. 11**
Bau- und Planungsrecht – Rechtliche Hemmnisse und Anreize für Ladeinfrastruktur im Neubau und Bestand

**Ergebnispapier Nr. 15**
eMob Ladeinfrastrukturdatenbank (Lastenheft)
(in Vorbereitung)

**Ergebnispapier Nr. 12**
Steuerrecht als Baustein und Einflussfaktor für die Elektromobilität
(in Vorbereitung)

**Ergebnispapier Nr. 16**
Fortschrittsbericht

**Ergebnispapier Nr. 17**
Internationales Benchmarking zum Status quo der Elektromobilität in Deutschland 2015

**Ergebnispapier Nr. 18**
Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen

**Ergebnispapier Nr. 19**
Energierechtliche Einordnung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge

## Für Ihre Notizen

# Impressum

**Herausgeber**
Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW)
Ergebnispapier Nr. 18

Deutsches Dialog Institut GmbH
Eschersheimer Landstraße 223 · 60320 Frankfurt am Main
Telefon: +49 (0)69 159003-0 · Telefax: +49 (0)69 759003-66
info@buw-elektromobilitaet.de · www.schaufenster-elektromobilitaet.org

**Autoren**
Sebastian Fischhaber, Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e. V.
Anika Regett, Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e. V.
Simon F. Schuster, Technische Universität München (TUM) – Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES)
Dr. Holger Hesse, Technische Universität München (TUM) – Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES)

**Redaktionskreis**
Christian Metzger, RWE AG
Gordon Gassmann, Deutsche Accumotive GmbH & Co KG
Kathrin Seibold, BMW AG
Maike Schmidt, ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Markus Monhof, ERCIS European Research Center for Information Systems – Universität Münster
Dr. Matthias Wirth, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
Dr. Moritz Vogel, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
Dr. Patrick Ester, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
Dr. Sascha Nowak, MEET Münster Electrochemical Energy Technology – Universität Münster
Dr. Kai-Christian Möller, Fraunhofer ICT-Institut für Chemische Technologie

**Gesamtleitung**
Ehsan Rahimzei, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität
Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main
Telefon.: +49 (0)69 6308 309 · ehsan.rahimzei@vde.com

**Layout, Satz, Illustration**
Medien&Räume | Kerstin Gewalt

**Titelgrafik**
unter Verwendung von © chombosan/Fotolia.com und © VIGE.co/Fotolia.com (jeweils bearbeitet)

**Druck**
Druckerei Lokay e. K.
Königsberger Str. 3 · 64354 Reinheim

klimaneutral
natureOffice.com | DE-344-471816
gedruckt

FSC
www.fsc.org
MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C019545

# Die Konsortialpartner

- **BridgingIT GmbH**
  N7, 5–6 · 68161 Mannheim
  www.bridging-it.de

- **Deutsches Dialog Institut GmbH**
  Eschersheimer Landstr. 223 · 60320 Frankfurt am Main
  www.dialoginstitut.de

- **VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.**
  Technik & Innovation · Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main
  www.vde.com


Kontakt für die Öffentlichkeitsarbeit
**Deutsches Dialog Institut GmbH** · Eschersheimer Landstr. 223 · 60320 Frankfurt am Main
+49 (0)69 153003-0 · info@buw-elektromobilitaet.de · www.schaufenster-elektromobilitaet.org


# Die Studienbearbeiter

- Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e. V.
  Am Blütenanger 71 · 80995 München
  www.ffe.de

- Technische Universität München (TUM)
  Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES)
  Arcisstr. 21 · 80333 München
  www.ees.ei.tum.de

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages