

ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE PERFORMANCE STATIONÄRER LI-ION-BATTERIESPEICHER

Manuel BAUMANN¹, Jens PETERS², Marcel WEIL^{1, 2}

¹Karlsruher Institut für Technologie - ITAS, +49 721-608-23215, Postfach 3640, PLZ: 76021
Karlsruhe manuel.baumann@kit.edu, <https://www.itas.kit.edu>

² Karlsruher Institut für Technologie - HIU, Albert-Einstein-Allee 11, D-89081 Ulm,
j.peters@kit.edu, marcel.weil@kit.edu, <http://www.hiu-batteries.de>

Kurzfassung: Li-Ionenbatterien können einen wertvollen Beitrag zur sicheren Systemintegration erneuerbarer Energien im Rahmen der Energiewende liefern. Allerdings ist die Produktion dieser Systeme noch relativ teuer sowie energie- und emissionsintensiv und keine Batterie kann allen Anforderungen hinsichtlich Umweltverträglichkeit und Kosten gerecht werden. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird der Einfluss unterschiedlicher Anforderungen auf die ökologische und ökonomische Performance relevanter marktgängiger Li-Ionen Batterien (Li-Eisenphosphat (LFP), Lithium-Titanat (LTO), Li-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC), Li-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA) und Li-Mangan-Oxid (LMO)) mittels Ökobilanz (LCA) und Lebenszykluskostenrechnung (LCC) untersucht. Hierzu werden vereinfachte Szenarien auf Basis eines Optimierungsmodells für ein dezentrales Netz im Rahmen einer Monte-Carlo Simulation verwendet und eine umfassende Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die LCA- und LCC-Ergebnisse zeigen, dass jeder Batterietyp unterschiedliche Ausprägungen besitzt. So hat LMO in drei Umweltkategorien (ADP, GWP und HTP) die höchsten Umweltwirkungen erzielt, während NCA bei AP potenziell hohe Auswirkungen auf die Umwelt hat. Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass die Energiedichte einen relativ großen Einfluss auf die ökologischen Auswirkungen aller Li-Ion Batterietypen hat. Bei den Lebenszykluskosten erzielen vor allem LFP, NMC und NCA ähnliche Resultate, während LTO (hoher Zellpreis) und LMO (niedrige Lebensdauer) vergleichsweise deutliche höhere Kosten aufweisen. Als weitere sensitive Parameter konnten vor allem der Wirkungsgrad, Stromkosten, und Entladedauer identifiziert werden.

Keywords: Lithium-Ionenbatterien, Ökobilanz, Lebenszykluskosten, Stationäre Batteriespeicher

1 Einleitung

Die zunehmende Systemintegration erneuerbarer Energien geht einher mit einer erhöhten Nachfrage geeigneter Flexibilitätsoptionen, um zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Last im Netz zu gewährleisten. Dabei stellt sich die Frage, welche Technologie für den jeweiligen Bereich die kostengünstigste Option darstellt. Lithium-Ionen-Batterien können aufgrund ihrer technischen Eigenschaften (z.B. je nach Elektrodenchemie hoher Wirkungsgrad, hohe Lebensdauer) einen wertvollen Beitrag zur Erfüllung dieser Nachfrage im Rahmen der Energiewende leisten. Allerdings ist die Produktion dieser Systeme noch relativ teuer sowie energie- und emissionsintensiv, weshalb weitere Reduktionspotenziale in diesen Bereichen für die Zukunft erschlossen werden müssen. Hinzu kommt, dass es eine Vielzahl unterschiedlicher Li-Ion Elektrodenkombinationen gibt, welche alle ihre Vor- und Nachteile haben und je nach Typ nur in gewissen Netzanwendungen sinnvoll einsetzbar sind. Keine

Batterie kann allen Anforderungen z.B. hinsichtlich hoher Umweltverträglichkeit und niedrigen Kosten gerecht werden. Entsprechend ist die Wahl einer geeigneten Li-Ionen-Batterietechnologie immer in gewisser Weise ein Trade-off. Für die Wahl einer geeigneten Batterie ist es von hoher Wichtigkeit die Anforderungen einer entsprechenden Netzanwendung zu kennen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird der Einfluss unterschiedlicher Anforderungen (z.B. durch Zyklenhäufigkeit, Entladetiefe und Lebensdauer) für einen exemplarischen dezentralen Anwendungsfall auf die ökologische und ökonomische Performance relevanter marktgängiger Li-Ionen-Batterien untersucht. Zusätzlich wird eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse ausgewählter Betriebs- und Batterieparameter durchgeführt, um den Einfluss einzelner Stellvariablen auf die Gesamtergebnisse zu ermitteln.

2 Methodik

Für die Bewertung der berücksichtigten Li-Ionen-Batterien wird auf die Methodik der Ökobilanz (LCA) [1], [2] und der Lebenszykluskosten (LCC) [3] zurückgegriffen. Die Batteriespeicher werden dazu eingesetzt, den Anteil an durch PV und Windkraft erzeugter Elektrizität am lokalen Verbrauch zu erhöhen. Hierfür werden 3 vereinfachte Szenarien (Base-case, doppelte Speicherkapazität und reduzierte Auslastung) auf Basis eines Optimierungsmodelles betrachtet [4], [5]. Eine Übersicht zur angenommenen Systemgrenze, einer beispielhaften Zeitreihe sowie des resultierenden Strommixes für das angenommene System und eingespeicherter Energie in den Batteriespeicher sind in **Abbildung 1** ~~Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.~~ gegeben.

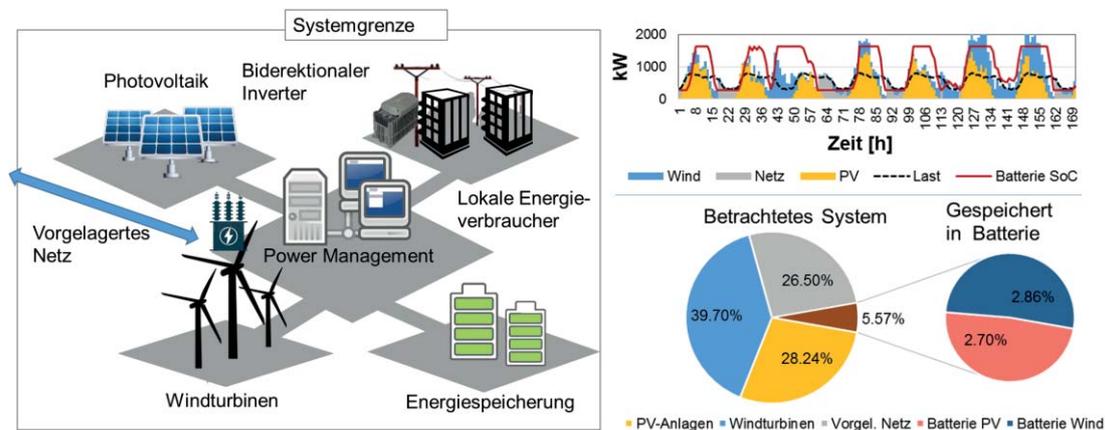


Abbildung 1: Verwendetes Referenzmodell für ein vereinfachtes dezentrales Netz nach [4] und [5]

Berücksichtigte Elektrotypen sind Lithium-Eisenphosphat (LFP), Lithium-Titanat (LTO), Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA) und Lithium-Mangan-Oxid (LMO).

2.1.1 Lebenszykluskostenberechnung und Annahmen

Für die Berechnung der Lebenszykluskosten wird nach [3] unter Verwendung der Annuitätenmethode verfahren. Als funktionelle Einheit dient eine im Batteriespeicher umgesetzte kWh, wobei die Batterien entsprechend ihrer Wirkungsgrade zur Verlustkompensierung dimensioniert werden um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen

Technologien zu gewährleisten. Der angenommene Zinssatz liegt nach [6] bei 6 % (z.B. aus Stadtwerksperspektive) bei einer Projektdauer von 20 Jahren. Kosten für Elektrizität basieren auf [4] und berücksichtigen keine Vergütung oder Strafzahlungen durch das vorgelagerte Netz. Des Weiteren werden potenziell anfallende Netzentgelte, Stromsteuer und EEG-Umlage vernachlässigt (bis zu 12 €ct. Mehrbelastung [7]). Allerdings können die Auswirkungen dieser potenziellen zusätzlichen Kosten in der Sensitivitätsanalyse der Strompreise in Kapitel 3 mitabgeschätzt werden.

In Tabelle 1 ist eine Übersicht und Zusammenfassung angenommener Inputparameter für die LCC und LCA gegeben, welche ebenfalls Einblick in die hohe Varianz techno-ökonomischer Annahmen und daraus resultierenden potenziellen Unsicherheiten gewährt. Im Rahmen der Analyse wird deshalb die Methode der Monte-Carlo Simulation zurückgegriffen, um diese Unsicherheiten abbilden zu können. Als Verteilfunktion wird dabei auf eine beta-PERT-Verteilung gemäß [8] zurückgegriffen. Für die Berechnung wird MS-Excel und VBA verwendet.

Tabelle 1: Verwendete Berechnungsparameter auf Zell- ([9] und [10]) und Systemebene (siehe Quellen in Tabelle)

Komponente/Posten	Einheit	Bandbreite	LTO	LFP	LMO	NMC	NCA
Zellkosten	€/kWh	25 q	600	289	153	192	172
		Median	900	309	238	318	213
		75 q	1200	315	564	554	355
Zyklische Lebensdauer @ DoD 80 %	-	25 q	4500	1750	1000	1000	1250
		Median	8000	5000	1500	4000	3000
		75 q	9750	5325	5000	4875	5125
Wirkungsgrad	% DC-DC	25 q	81	83	85	83	90
		Median	90	96	94	93.8	91.5
		75 q	94.5	96.5	98.2	97.2	93.1
Kalendarische Lebensdauer	a	25 q	10	7.5	5	5	10
		Median	17.5	15	10	10	10
		75 q	25	20	15	15	15
O&M	€/kW y	25 q	11	17	20	20	20
		Median	25	25	25	20	25
		75 q	33.8	31.3	30	30	30
Batteriemangement, Klimatisierung etc.	€/kW	273-475 [11], [12], [13]					
Wechselrichter	€/kW	Abh. Von Anlagengröße / hier skaliert ~ 500 [11], [14]					
Anlagenaufbau	€/kW	~125 [12]					
Genehmigungen etc.	€/kW	~50 [13]					

Bei den Batteriezellen sind vor allem die kalendarische sowie zyklische Lebensdauer von hoher Bedeutung für die Modellierung, da diese mit einem sukzessiven Kapazitätsverlust einer elektrochemischen Zelle einhergehen. Erstere wird durch chemische Nebenreaktionen, welche beim Betrieb sowie Standby einer Batterie auftreten können, bestimmt. Bei der zyklischen Lebensdauer sind vor allem die Wechselwirkung zwischen Entladetiefe (engl. Depth of Discharge; DoD) und zyklischer Lebensdauer von Interesse. Beide Formen der Batteriealterung treten immer in Kombination auf und sind u.a. noch vom Zelldesign, Betriebstemperaturen, C-raten (Entladestrom und dem Ladestand der Batterie (engl. State of Charge; SoC) abhängig [15].

Im Rahmen dieser Betrachtung wird deshalb ein vereinfachtes zyklisches Lebensdauer-DoD Modell für unterschiedliche Li-Ionen Batterien verwendet. Dadurch ist es ebenfalls möglich den Mindest-SoC der Batterie so zu optimieren, dass möglichst keine Ersatzinvestitionen getätigt werden müssen. Bei einem Austausch der Zellen werden zudem potenzielle Kostenreduktionen mittels Lernkurven berücksichtigt (angenommener Kostendegression von 17% pro Jahr). Zusätzlich wird vereinfacht angenommen, dass sich die kalendarische und zyklische Lebensdauer aller berücksichtigten Li-Ion-Zelltypen über 20 Jahre bis zu 20 % erhöht. Eine genaue Übersicht zur verwendeten Methodik, angenommenen Lernkurven für Lithium-Ionen-Batteriezellen und dynamischer Batterie-Lebensdauerberechnung ist in [9] und [16] gegeben.

2.1.2 Ökobilanzierungsmethodik und Annahmen

Die der Berechnung zugrunde liegenden Inventardaten basieren auf [17], wobei zusätzlich zu den dort modellierten LFP-basierten LIB-racks auch noch LMO, NCM und NCA Batteriespeicher betrachtet werden. Zu diesem Zweck werden modulare Inventardatensätze verwendet, welche es erlauben, die selbe Batteriekonfiguration unter Verwendung unterschiedlicher Zellchemien abzubilden [18]. Prinzipiell besteht jeder Batteriespeicher aus einem Rack, welches mehrere Batteriemodule in Form von Einschüben, ein BMS Modul sowie einen Ventilatoreinschub zur Kühlung beherbergt. Jedes Batteriemodul besteht aus 570 einzelnen luftgekühlten Rundzellen (Typ 18650). Abhängig von der Energiedichte der Zellen werden dabei pro Rack zwischen 7 und 11 Batteriemodule benötigt, um auf eine Kapazität von 25kWh zu kommen. Diese Racks werden dann der Einfachheit halber linear hochskaliert, so dass für einen Speicher von 1 MWh 40 Racks a 25kWh angesetzt werden.

Für die Berechnung der Umweltauswirkungen wird die ILCD Methode verwendet, wobei die folgenden Wirkungskategorien betrachtet werden:

- Erderwärmungspotential (engl. global warming potential GWP): Beitrag zum Klimawandel
- Versauerungspotential (engl. acidification potential; AP): Saurer Regen, Gewässerversauerung
- Humantoxizitätspotential (HTP): Emission gesundheitsschädlicher Substanzen
- Ressourcenverarmungspotential (engl. abiotic depletion potential; ADP): Dissipation und Verknappung endlicher mineralischer Ressourcen

Tabelle 2: Übersicht über „cradle to gate“ Umweltauswirkungen für unterschiedliche Li-Ionen Batterien auf Basis von [18]

Batterietyp	LMO	NCM	NCA	LTO	LFP	Einheit
Energiedichte	76.0	82.5	84.0	37.8	57.6	Wh/kg
ADP	7.13E-02	8.70E-02	7.47E-02	9.93E-02	6.44E-02	kg Sb eq.
AP	1.87E+00	3.46E+00	6.55E+00	2.80E+00	2.73E+00	Mole H+ eq.
GWP	1.60E+02	1.53E+02	1.58E+02	4.07E+02	2.41E+02	kg CO2 eq.
HTP	4.83E-04	4.53E-04	3.80E-04	2.82E-04	2.71E-04	CTUh

In Abbildung 2 sind die berücksichtigten Umweltauswirkungen der fünf unterschiedlichen Batterietypen dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Einheiten werden die Auswirkungen für die Herstellung einer kWh Speicherkapazität als relative Werte dargestellt, was eine

schnelle Übersicht über die unterschiedlichen Ausprägungen erlaubt (als absoluter Bezug sind die Werte aus Tabelle 2 heranzuziehen).

Die Berechnung der Umweltauswirkungen durch die Stromerzeugung mittels Photovoltaik und Windturbinen basiert auf repräsentativen ecoinvent 3.3 Datensätzen (>3MW turbine, onshore und photovoltaic, 570kWp open ground installation). Zu erwähnen ist, dass das Recycling der betrachteten Batterietechnologien nicht in die Berechnung eingegangen ist. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass es noch keine wirklich etablierten industriellen Recyclingverfahren für Li-Ionen Batterien gibt. Hinzu kommt, dass je nach Elektrodentyp unterschiedliche Verfahren für die Rückgewinnung einzelner Komponenten wie Kobalt oder Mangan anzuwenden sind. Weiterführende Informationen zum Thema Recycling sind in [21] und [22] zu finden.

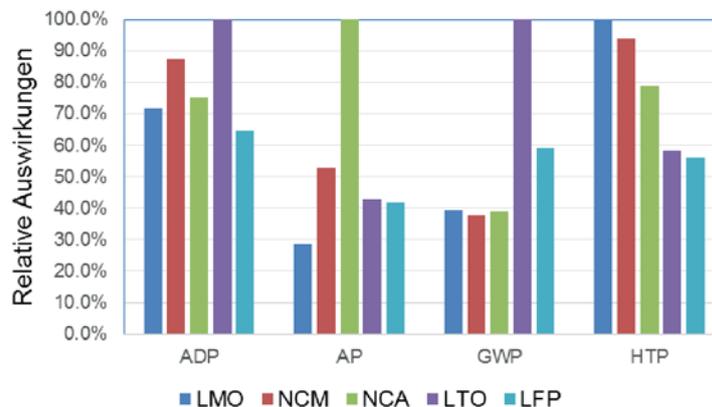


Abbildung 2: Relative Umweltauswirkungen der Produktion unterschiedlicher Li-Ionen-Batterien auf Basis von [18]

Die Berechnung ist über die Verwendung der Software openLCA [19] und der ecoinvent Datenbank Version 3.3 [20] erfolgt. Als funktionelle Einheit dient wie zuvor bei den LCC jede im Batteriespeicher ein- und ausgespeicherte kWh.

3 Ergebnisse

Folgend wird auf die potenziellen Lebenszykluskosten und Ökobilanzergebnisse sowie auf die entsprechenden Sensitivitätsanalysen eingegangen.

3.1 Potenzielle Lebenszykluskosten

Die Ergebnisse der LCC-Berechnung sind in Form von Boxplots in Abbildung 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die Ergebnisse je nach Szenario stark unterscheiden. So ergeben sich in der Variante „Doppelte Kapazität“ bei gleicher Zyklenzahl etwas geringere LCC im Verhältnis zum Referenzfall („Base-case“). Eine Reduzierung der Zyklenanzahl im Szenario „Geringe Auslastung“ führt zu deutlich höheren LCC als in den anderen Szenariovarianten. In allen Varianten weist die LTO-Batterie, gefolgt von LMO die höchsten LCC auf. Dies ist bei ersterer auf sehr hohe Zellkosten und bei letzterer auf eine geringe zyklische Lebensdauer und dadurch erhöhten Ersatzinvestitionen zurückzuführen.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden einzelne Eingangsparameter für den Base-case im Bereich von -20% bis +20% um den Median variiert (rote Balken in Abb. 3), um relative Auswirkungen dieser auf die LCC-Resultate zu analysieren. Eine Übersicht über die

Auswirkungen der Varianzanalyse ist in Abbildung 4 gegeben. Hierbei ist zu beachten, dass z.B. eine Erhöhung der Stromkosten zu einer Steigerung der LCC führt, während eine Erhöhung des Wirkungsgrades zu einer Reduktion der selbigen führt. Die Erhöhung des Wirkungsgrades ist maximal auf (unrealistische) 100% möglich, weshalb hier auch nur entsprechend geringe Auswirkungen zu beobachten sind. Eine Reduktion der Wirkungsgrade führt zu einer deutlichen Steigerung der Kosten, da eine verringerte Effizienz neben höheren Verlusten ebenfalls Auswirkungen auf die Dimensionierung der Speicher hat.

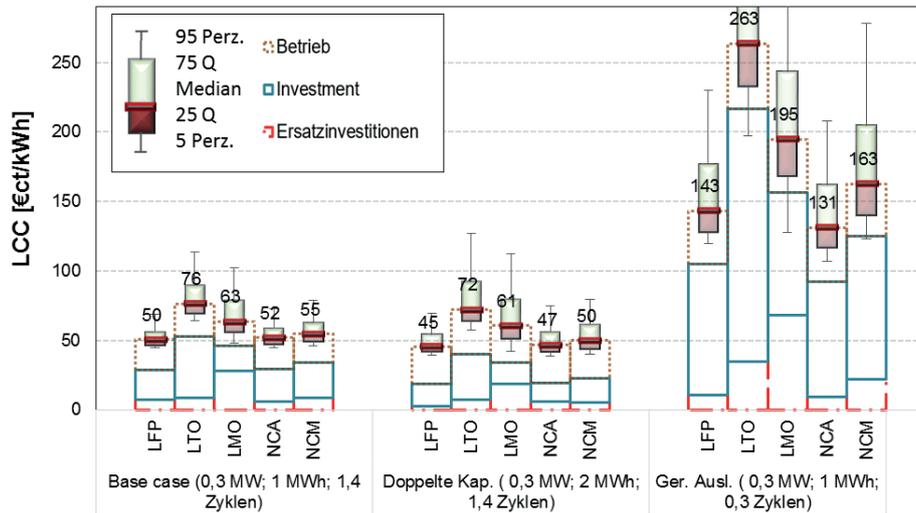


Abbildung 3: LCC-Ergebnisse (n=1000) unter Berücksichtigung unterschiedlicher der Grundannahmen (Base-case, Doppelte Kapazität und geringe Auslastung)

Eine Erhöhung der kalendarischen Lebensdauer hat bei den meisten Lithiumbatterien nur eine geringe Auswirkung, da die zyklische Lebensdauer in den meisten Fällen die Häufigkeit getätigter Ersatzinvestitionen der Batteriezellen determiniert. Eine Ausnahme bildet die LTO-Batterie, da diese bereits eine sehr hohe zyklische Lebensdauer aufweist und somit die kalendarische Lebensdauer hier bestimmend ist. Bei einer Änderung der Zellpreise ergeben sich ähnlich geringe Auswirkungen für NCA, NMC und LFP. Eine Ausnahme bilden hier abermals die LTO (hohe Zellkosten) sowie die LMO-Batterie (geringe zyklische Lebensdauer).

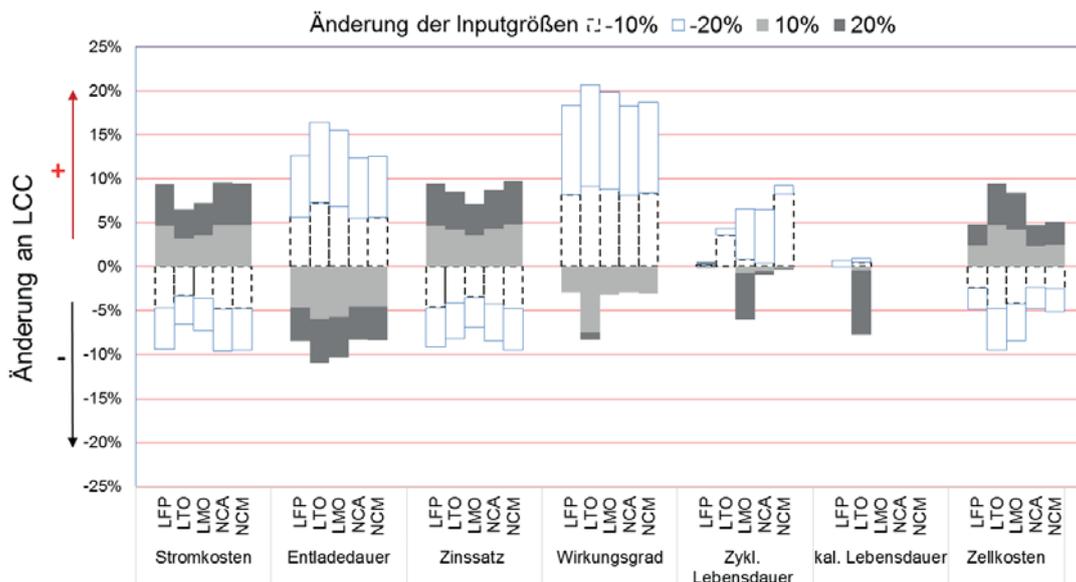


Abbildung 4: LCC-Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Inputparameter; Variierung um jeweils +/- 20 Prozent im Verhältnis zu Medianwerten (Siehe Abb. 3 und Tabelle 1).

3.2 Potenzielle Umweltauswirkungen

Die Berechnungen im Rahmen der Ökobilanz werden nur für den Base-case dargestellt, da sich die Verhältnisse der Ergebnisse in den anderen Szenarien ähnlich gestalten. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Abbildung 5 gegeben.

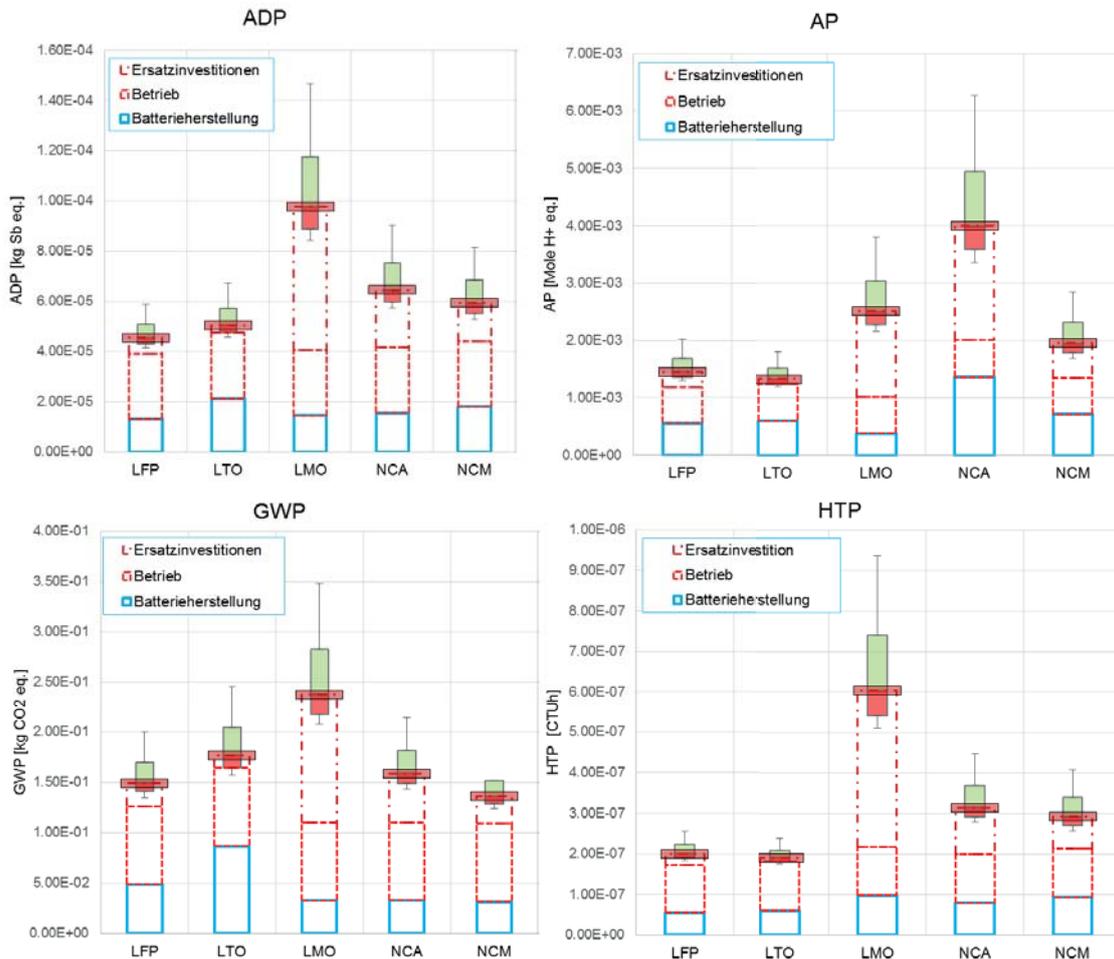


Abbildung 5: Monte-Carlo Ergebnisse (n=1000) für die vier berücksichtigten Umweltauswirkungskategorien Erderwärmungspotential (GWP), Versauerungspotential (AP), Humantoxizitätspotential (HTP), Ressourcenverarmungspotential (ADP) für die Ein- und Ausspeisung von 1kWh

Es zeigt sich, dass LMO aufgrund seiner geringen zyklischen Lebensdauer und daraus resultierenden Ersatzinvestitionen die höchsten Auswirkungen bei ADP, GWP und HTP besitzt. Lediglich bei AP ergeben sich bei NCA aufgrund eines höheren Nickelanteils höhere Auswirkungen. LFP und LTO erzielen aufgrund einer hohen Lebensdauer gute Ergebnisse (außer bei GWP, was auf einen hohen Energiebedarf bei der Produktion zurückzuführen ist).

Wie zuvor bei den LCC wird ebenfalls für die Ökobilanz eine Sensitivitätsanalyse auf Basis des Base-cases durch Variierung ausgewählter Inputparameter von -20% bis +20% um die Mediane (rote Balken in Abb. 5) durchgeführt. Insgesamt sind die Ausprägungen der Sensitivitäten für die unterschiedlichen Li-Ionen-Batterien für die vier berücksichtigten Umweltauswirkungskategorien vergleichbar. Wie auch zuvor beim LCC hat eine Reduktion des Wirkungsgrades ebenfalls hohe Auswirkungen die ökologische Performance aller Batterietypen. Dies trifft ebenfalls auf die Energiedichte der Batterien zu, da diese die zu

produzierende „Masse“ an Zellen bestimmt. Ähnliche Auswirkungen hat eine Änderung der Zellproduktionsaufwendungen.

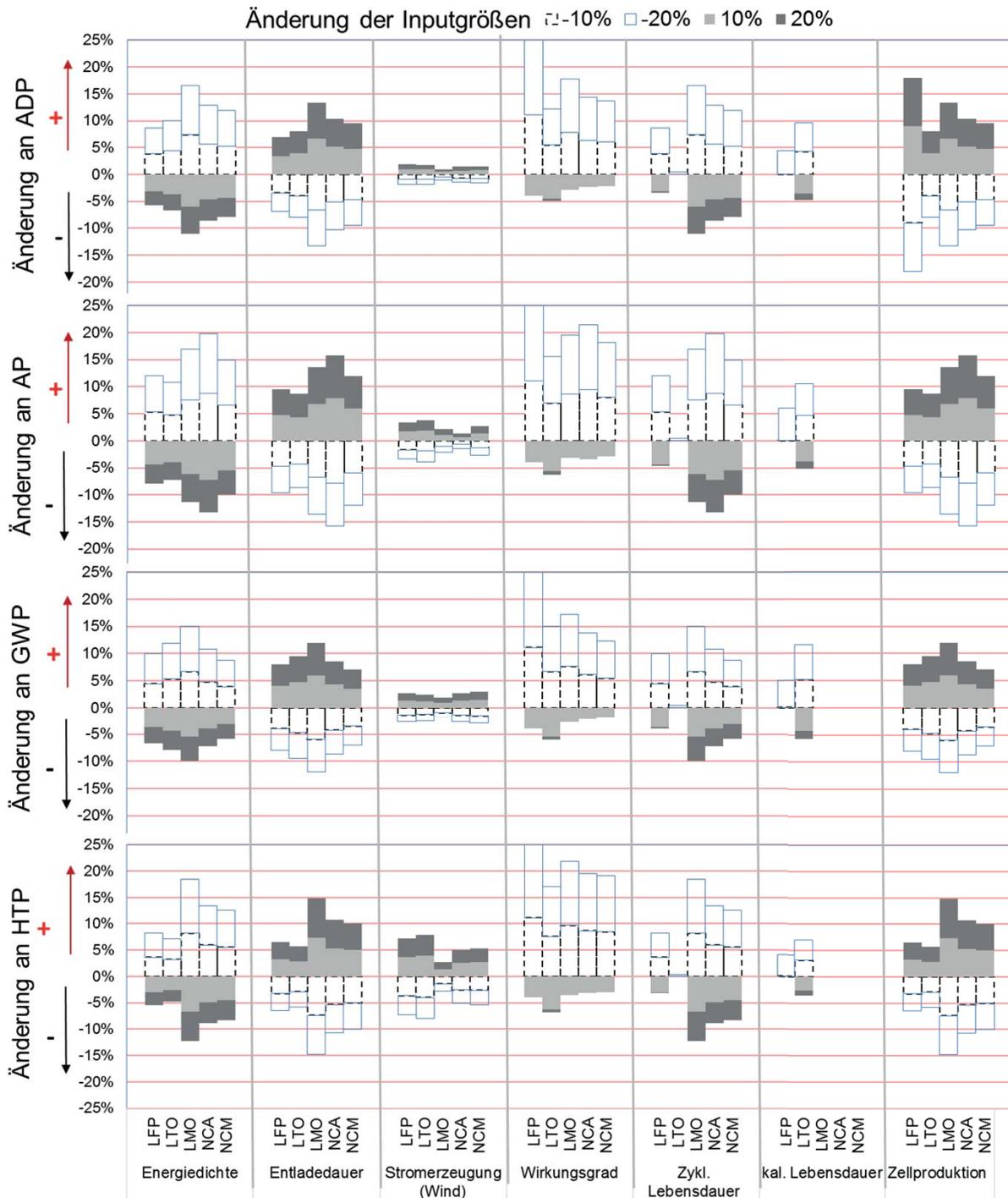


Abbildung 6: LCA - Sensitivitätsanalyse für alle Umweltauswirkungskategorien und Li-Ionen-Batterietypen durch Variierung einzelner Parameter um jeweils +/- 20 Prozent für den Base-case (Medianwerte in Abb. 5).

Eine Änderung der kalendarischen und zyklischen Lebensdauer hat im Verhältnis zur LCC einen deutlich höheren Einfluss auf die Endergebnisse. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass bei der ökologischen Bewertung keine Diskontierung anfällt. Bei der LCC führt dies zu einer geringeren Auswirkung auf das Gesamtergebnis, da Ersatzinvestitionen erst nach ein paar Jahren anfallen und somit weniger „ins Gewicht fallen“.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchung zeigt sich, dass die hier präsentierten Ergebnisse für die LCA und LCC sehr stark in Abhängigkeit der Szenario- und Parameterannahmen sowie berücksichtigten Li-Ion-Elektrodenmaterialien variieren können. Dies ist vor allem auf unterschiedliche Lebensdauern der Speicher zurückzuführen, was (beim Erreichen des Lebensendes) einen Ersatz der Zellen zur Folge hat. Zu erwähnen sind ebenfalls die relativ hohen Unsicherheiten, die sich durch die große Bandbreite an Inputparametern aus einer Datenbank ergeben (Zellkosten, Lebensdauern etc.). Durch die Sensitivitätsanalyse kann der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf unterschiedliche LCA-Auswirkungskategorien und LCC dargestellt werden.

Bei der Ökobilanz zeigt sich, dass es schwierig ist eine eindeutige Antwort auf die Vorteilhaftigkeit einer Technologievariante zu geben, da jeder Batterietyp in Abhängigkeit der gewählten Umweltauswirkungskategorie unterschiedliche Ausprägungen besitzt. So erzielt LMO in drei Kategorien (ADP, GWP und HTP) die schlechtesten Ergebnisse, während NCA bei AP potenziell hohe Auswirkungen auf die Umwelt hat. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die für stationäre Anwendungen oftmals als unwichtig erachtete Energiedichte einen relativ großen Einfluss auf die Ergebnisse hat, da eine geringere Energiedichte zu einem größeren „Massenbedarf“ an Zellen und damit verbunden Herstellungsaufwänden führt. Auch bei einer Reduktion der Wirkungsgrade ergeben sich signifikante Änderungen der errechneten Ergebnisse.

Bei den Lebenszykluskosten erzielen LFP, NCA und NMC für den Base-Case relativ ähnliche Ergebnisse. LMO und LTO weisen hier deutlich höhere Kosten im Verhältnis zu den anderen Li-Ionen-Batterievarianten auf. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse sind als besonders relevant der angenommene Zinssatz, Wirkungsgrad, Stromkosten und gefahrene Zyklen pro Tag zu nennen. Das Variieren der Zellkosten führt für LFP, NMC und NCA nur zu geringen Änderungen der Gesamtergebnisse, was auf einen starken Preisverfall der Zellen zurückzuführen ist. Dies trifft auch auf LMO zu, allerdings haben diese Zellen eine geringere Lebensdauer, weshalb entsprechend oft Ersatzinvestitionen getätigt werden müssen.

Abschließend ist zu erwähnen, dass bei der vorliegenden Betrachtung das Lebensende, d.h. Entsorgung und potentiell Recyclingpotential, nicht betrachtet werden. Obwohl diese Phase ggf. für einzelne Umweltauswirkungen relevant ist, gibt es aktuell kaum verwertbare und differenzierbare Daten zu den zellspezifischen Recyclingpotenzialen, weshalb hier noch weiterer Forschungsbedarf besteht.

Literaturverzeichnis:

- [1] ISO, "ISO 14040 – Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.
- [2] ISO, "ISO 14044 – Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.
- [3] VDI, "VDI 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC) Purchase, operating and maintenance of production equipment using Life Cycle Costing (LCC)," VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, Berlin, 2006.

- [4] M. Baumann, C. Marcelino, J. Peters, M. Weil, P. Almeida, and E. Wanner, "Environmental impacts of different battery technologies in renewable hybrid micro grid systems," presented at the IEEE International Conference on Innovative Smart Grid Technologies, Torino Italy, 2017.
- [5] H. Borhanazad, S. Mekhilef, V. Gounder Ganapathy, M. Modiri-Delshad, and A. Mirtaheri, "Optimization of micro-grid system using MOPSO," *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 295–306, Nov. 2014.
- [6] A. Malhotra, B. Battke, M. Beuse, A. Stephan, and T. Schmidt, "Use cases for stationary battery technologies: A review of the literature and existing projects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 705–721, Apr. 2016.
- [7] S. Bolay, T. Bullmann, and M. Hegner, "Faktenpapier Energiespeicher; Rechtsrahmen, Geschäftsmodelle, Forderungen," BVES - Bundesverband Energiespeicher e.V. Berlin und DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag Berlin | Brüssel, Berlin, März 2017.
- [8] B. Battke, T. S. Schmidt, D. Grosspietsch, and V. H. Hoffmann, "A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 240–250, Sep. 2013.
- [9] M. J. Baumann, J. F. Peters, M. Weil, and A. Grunwald, "CO2 footprint and life cycle costs of electrochemical energy storage for stationary grid applications," *Energy Technol.*, Dec. 2016.
- [10] P. Stenzel, M. Baumann, and J. Fleer, "Database development and evaluation for techno-economic assessments of electrochemical energy storage systems," presented at the EnergCon, Dubrovnik Croatia, 2014.
- [11] V. Viswanathan, M. Kintner-Meyer, P. Balducci, and C. Jin, "National Assessment of Energy Storage for Grid Balancing and Arbitrage Phase II Volume 2: Cost and Performance characterization," Pacific Northwest National Laboratory, USA, PNNL-21388, Sep. 2013.
- [12] G. Fitzgerald and J. Morris, "Battery Balance of System Charrette," Rocky Mountain Institute, USA, Report or White Paper, 2015.
- [13] N. Di Orio, A. Dobos, and S. Janzou, "Economic Analysis Case Studies of Battery Energy Storage with SAM," National Renewable Energy Laboratory, Golden, California, USA, Nov. 2015.
- [14] Abbas A. Akhil, Georgianne Huff, Aileen B. Currier, Benjamin C. Kaun, Dan M. Rastler, and Stella Bingqing Chen, Andrew L. Cotter, Dale T. Bradshaw, and William D. Gauntlett, "DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA," Sandia National Laboratories, Albuquerque and Livermore, USA, Jul. 2013.
- [15] C. Daniel and J. Besenhard, *Handbook of Battery Materials*, 2. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., 2011.
- [16] J. F. Peters, M. Baumann, B. Zimmermann, J. Braun, and M. Weil, "The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 491–506, Jan. 2017.
- [17] J. F. Peters and M. Weil, "Aqueous hybrid ion batteries- an environmentally friendly alternative for stationary energy storage?," *J. Power Sources*, vol. 364, pp. 258–265, 2017.
- [18] J. F. Peters and M. Weil, "Providing a common base for life cycle assessments of Li-Ion batteries," *J. Clean. Prod.*, no. 171, pp. 704–713, 2018.
- [19] GreenDelTaTC Tools & Consulting for Sustainability, "The openLCA Software," 2012. [Online]. Available: <http://greendeltatc.com/openLCA-Framework.115.0.html>. [Accessed: 20-Apr-2012].
- [20] Swiss Center for Life Cycle Inventories, "ecoinvent centre," Swiss Center for Life Cycle Inventories, Zürich, CH, 2012.
- [21] J. B. Dunn, L. Gaines, J. C. Kelly, C. James, and K. G. Gallagher, "The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction," *Energy Env. Sci*, vol. 8, no. 1, pp. 158–168, 2015.

- [22] K. Fisher, E. Wallén, P. P. Laenen, and M. Collins, “Battery Waste Management Life Cycle Assessment,” Environmental Resources Management (ERM), Final Report for Publication, 2006.