

## Elektrochemische Energiespeicher für mobile Anwendungen im Fokus der Systemanalyse

von Marcel Weil, Institut für Technikfolgen-  
abschätzung und Systemanalyse (ITAS),  
Karlsruhe, Jens Peters, Helmholtz-Institut  
Ulm, Manuel Baumann, Hanna Dura und Be-  
nedikt Zimmermann, ITAS, Karlsruhe

Elektrochemische Speicher werden als Schlüsseltechnologie der Elektromobilität und Energiewende angesehen. Durch ökobilanzielle Untersuchungen lassen sich sowohl die Umweltwirkungen der Batterieherstellung als auch mögliche Umweltvorteile der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge gegenüber konventionellen Fahrzeugen oder anderen Antriebskonzepten quantitativ bewerten. Dabei zeichnet sich ab, dass Elektrofahrzeuge unter heutigen Rahmenbedingungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg relativ einfach Umweltvorteile erreichen können, die sich in der Zukunft mit höheren Anteilen an regenerativen Energieerzeugungsquellen weiter erhöhen werden. Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse lebenszyklusorientierter ökonomischer Analysen. Hier zeigt sich, dass sich heute nur unter äußerst günstigen Randbedingungen ökonomische Vorteile für Elektrofahrzeugbesitzer ergeben. Dabei stellt die Batterie den treibenden Faktor der Produktionskosten eines Elektrofahrzeugs dar. Neueste Studien zeigen jedoch, dass zukünftig die Batteriekosten soweit sinken könnten, dass Elektrofahrzeuge konkurrenzfähig zu konventionellen und alternativen Antriebskonzepten sind.

*Electrochemical energy storage systems are considered as a key technology for electro mobility and the German energy turnaround. Life cycle assessment does not only reveal the environmental impacts of battery production, but can also quantitatively evaluate the potential environmental advantages of electric vehicles against vehicles with conventional or other alternative power train concepts. The results also show that it is quite easy to achieve environmental advantages throughout the entire life cycle of electric vehicles under the current framework conditions. These advantages could be further improved in the future with a*

*growing share of energy production from renewable sources. In contrast, electric vehicles cannot economically compete with conventional vehicles in most cases. One major cost driver of the electric vehicle production is the battery. However, recent studies showed that the costs for batteries could decrease significantly in the future to make electric vehicles competitive against those with conventional or other alternative power train concepts.*

### 1 Energiespeicher unter Innovationsdruck – damals und heute

Die Batteriespeicher- bzw. Akkutechnologie sah sich bereits vor mehr als 100 Jahren mit hohen Innovationserwartungen konfrontiert. Im Vorwort des Handbuchs „Der Edisonakkumulator“ von Kammerhoff (1910) ist folgende Ausführung zu finden:

„Die Lösung verkehrstechnischer Fragen wird seit Jahren mit gespannter Aufmerksamkeit nicht nur von Fachleuten verfolgt. Was immer an Verbesserungen bei den modernen Verkehrsmitteln – Eisenbahn, Dampfschiff, Automobil, Motorrad, neuerdings Luftschiff – auftaucht, ist sicher, in den weitesten Kreisen Beachtung zu finden. Kein Wunder daher, dass man sowohl diesseits wie jenseits des Atlantiks interessiert aufhorchte, als zu Beginn des neuen Jahrhunderts der Telegraph die Kunde brachte, dass Edison sich die Aufgabe gestellt habe, mit Hilfe der Elektrizität, mit einem neuen Akkumulator das Problem des pferdelosen Wagens zu lösen. Wie so oft bei Erörterung technischer Angelegenheiten schoss auch in diesem Falle die Mehrzahl der Tageblätter in ihren Berichten über das erreichbare Ziel hinaus. Auf der einen Seite der wohl begründete Ruf des tatkräftigen Amerikaners als erfolgreicher Pionier der Elektrotechnik, auf der anderen Seite der Wunsch, aus der Misere des unzulänglichen Verkehrs mit Pferdefuhrwerk herauszukommen, ließ die Berichterstatter in begeisterten Schilderungen sich über alle Schwierigkeiten, ja über die Grenzen des technisch Erreichbaren hinwegsetzen. Notgedrungen musste auf die teilweise phantastischen Übertreibungen ein Rückschlag erfolgen, als die Verwirklichung der laut gewordenen Hoffnungen und Wünsche jahrein jahraus auf sich warten ließ. Hatte sich der erfahrene Techniker von vornherein gesagt, dass derartige prinzipielle Umwälzungen im Handumdrehen

nicht durchgeführt werden konnten, dass bestenfalls Jahre nötig seien, um greifbare Resultate zu erzielen, so fühlte das große Publikum sich infolge Nichterfüllung seiner Erwartungen enttäuscht und war vielfach geneigt, die Möglichkeit der Lösung des Problems auf dem angegebenen Wege an und für sich zu bezweifeln.“

Auch wenn sich die Energiespeicherkapazität seit dem Edisonakkumulator um ein vielfaches erhöht hat, sind mit den elektrochemischen Energiespeichern auch heute hohe Erwartungen verbunden. So wird weiterhin eine nennenswerte Performancesteigerung von vielen Akteuren in diesem Feld erwartet, um im stationären und automobilen Bereich einen Marktdurchbruch zu erfahren.

Es scheint so, dass insbesondere Firmen dazu tendieren, sehr optimistisch die Möglichkeiten ihrer eigenen Entwicklung darzustellen. So schien im Jahr 2010 das Energiespeicherproblem zwischenzeitlich gelöst und von dem damaligen Bundeswirtschaftsminister Rainer Brüderle (FDP) schon als Durchbruch gefeiert, als ein umgebauter vollelektrischer Audi A2 mit einer Akku-Technologie namens Kolibri (es handelt sich um Energiespeicher auf Lithium-Metall-Polymer-Basis) der Firma DBM Energy (aufgegangen in die Firma Kolibri Systems AG), eine Rekordfahrt von München nach Berlin (600 km) ohne (bekanntes) Ladestop absolvierte (Spiegel 2010). Leider ist nicht nur der Testwagen kurz nach der Rekordfahrt abgebrannt. Auch der angekündigte Durchbruch blieb bis heute aus (FAZ 2015). So wird bereits eine neue Rekordreichweite von 800 km des E-Fahrzeugs Quant F der Firma Nanoflowzell AG angekündigt, welches mit einer Flusszellentechnologie ausgestattet ist (Spiegel 2015). Aufgrund der wenigen verfügbaren Informationen zu dieser, aber auch zu anderen Technologien, können selbst Batterieexperten die Belastbarkeit solcher Versprechen kaum abschätzen.

Soweit sich solche Erfolgsmeldungen nicht bewahrheiten, muss der Verbraucher auf die nächsten, bereits in der Entwicklung befindlichen Batterie-Generationen für mobile Anwendungen warten, an denen weltweit geforscht wird (vgl. Thielmann et al. 2010). Hier zu nennen sind beispielsweise Metall-Schwefel Systeme (z. B. Li-S<sup>1</sup>) in naher Zukunft und Metall-Luft-Systeme

(z. B. Li-Luft) oder Fluor basierte Systeme in ferner Zukunft (> 2025–2030)<sup>2</sup>.

## 2 Lebenswegbezogene ökologische Analysen zu Energiespeichern für mobile Anwendungen

Einer der wesentlichen Motivationen für die Förderung von Elektromobilität ist die Reduzierung der negativen Umweltauswirkungen insbesondere im Transportsektor. Die EU sieht eine stärkere Elektrifizierung im Verkehr als zentrales Element für eine Reduzierung der Treibhausgas (THG)-Emissionen (EC 2009). Zur Quantifizierung möglicher Reduktionen steht die Lebenszyklusanalyse als Werkzeug zur Verfügung. Damit lassen sich Umweltauswirkungen von Produkten sowie Prozessen unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus ermitteln, d. h. inklusive der Vorketten wie der Ressourcengewinnung und Materialproduktion, aber auch des Lebensendes wie Abfallentsorgung und der damit verbundenen Belastungen (EC-JRC 2010; Guinee et al. 2001; ISO 2006a; ISO 2006b). Abhängig von der THG-Intensität des zur Ladung genutzten Stromes, können sich dabei tatsächlich hohe Vorteile für Elektrofahrzeuge hinsichtlich der Nutzungsphase ergeben (Faria et al. 2013; Rangaraju et al. 2015; Ritthoff/Schallaböck 2012). Auf der anderen Seite ist aber die Herstellung von Batterien aufwendig und ebenfalls mit signifikanten Umweltbelastungen behaftet (Dunn et al. 2015; Notter et al. 2010; Simon/Weil 2013). Des Weiteren erhöht die Batterie das Fahrzeuggewicht und damit den Verbrauch, weshalb für eine umfassende Quantifizierung und einen Vergleich mit konventionellen Antrieben der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden muss, von Produktion über Nutzungsphase bis hin zu Entsorgung und ggf. Wiederverwertung der Energiespeicher.

Es gibt eine Vielzahl von Studien zu den Umweltauswirkungen von Elektromobilität, jede mit einem eigenen Schwerpunkt und Detailniveau. Bisher existiert jedoch keine Studie, die alle gängigen Batterietypen umfasst, da sich die meisten Studien auf jeweils einen einzelnen oder eine kleine Auswahl von Batterietypen fokussieren. Die Verfahren zur Herstellung von verschiedenen Li-Ion-Batterietypen sind zwar prinzipiell

ähnlich, jedoch sind die verwendeten Materialien je nach Typ sehr unterschiedlich. Da der gesamte Lebenszyklus betrachtet wird, kommen aus den vorgelagerten Prozessen andere Elektrodenmaterialsynthese- und Materialgewinnungsverfahren zum Einsatz, sodass sich die Unterschiede in den Batterietechnologien primär in der Produktionsphase niederschlagen. Basierend auf einer Begutachtung aller in dieser Hinsicht verfügbaren Studien (Peters et al. 2015) wird versucht, im Folgenden ein typübergreifendes, generisches Bild der potenziellen Umweltauswirkungen von Li-Ionen-Batterien wiederzugeben.

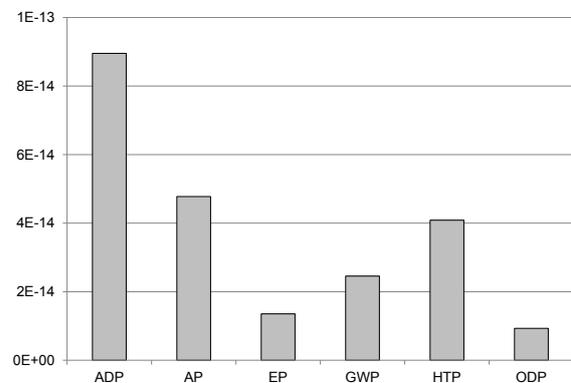
### 2.1 Herstellung von Energiespeichern

Die Produktion von Li-Ionen-Batterien ist tendenziell sehr energieaufwändig, da erhebliche Mengen an thermischer und elektrischer Energie benötigt werden. Dies gilt insbesondere für die Trocknung der Elektroden, Trockenräume, welche für die Zell-Assemblierung benötigt werden, sowie für die Konditionierung, in welcher die Batterien mehrere Male geladen und entladen werden. Aber auch die Vorketten, d. h. Produktion von Rohstoffen, deren Transport und die Synthese der Batteriematerialien spielen eine wichtige Rolle. Im Schnitt werden pro Wattstunde (Wh) hergestelltem elektrochemischen Speichers 328 Wh Energie benötigt (kumulativer Energieaufwand KEA, d. h. unter Einbeziehung aller Vorketten und damit auch z. B. der Wandlungsverluste bei der Stromerzeugung). Die durchschnittlich für die Produktion von 1 Wh Speicherkapazität anfallenden THG-Emissionen belaufen sich auf 116 kg CO<sub>2</sub>eq; ungefähr 250 mal so viel wie für die Bereitstellung von 1 Wh elektrischer Energie benötigt werden. Die durchschnittlichen THG-Emissionen für den europäischen Strommix 2008 beliefen sich auf 0,467 g CO<sub>2</sub>eq pro Wh (Hawkins et al. 2012). Dies veranschaulicht klar die Wichtigkeit des Batterieproduktionsprozesses für die Gesamtbilanz eines Elektrofahrzeuges.

Ökobilanzen haben jedoch das Ziel, ein umfassendes Bild der potenziellen Umweltbelastungen zu geben. Obwohl von Gesellschaft und Politik ein starker Fokus auf THG-Emissionen und Energieverbrauch gelegt wird, gibt es andere Wirkungskategorien, die mindestens ebenso

relevant sind. Um einen annähernden Eindruck von der Wichtigkeit anderer Kategorien bei der Batterieproduktion zu vermitteln, kann das Ergebnis der Ökobilanz normalisiert werden (EC-JRC 2010). Dafür wird das Ergebnis relativ zu einem gegebenen Belastungsprofil dargestellt, in diesem Fall den jährlich in Europa generierten Emissionen (Guinee et al. 2001). Abbildung 1 stellt die so normalisierten Ergebnisse (Durchschnittswerte aus allen berücksichtigten Lebenszyklusstudien zu Li-Ionen-Batterien) dar. Man sieht, dass, in Proportion zu den jährlich in Europa entstehenden Umweltauswirkungen, die Produktion einer Wh an Batteriekapazität vergleichsweise wenig zu den gesamten europäischen THG-Emissionen beiträgt, sondern dass vielmehr andere Kategorien wie Ressourcenverarmung, Versauerung und Humantoxizität potenziell wichtigere Rollen spielen.

**Abb. 1: Normalisierte Umweltauswirkungen für die Produktion von 1 Wh Li-Ionen-Batteriekapazität**



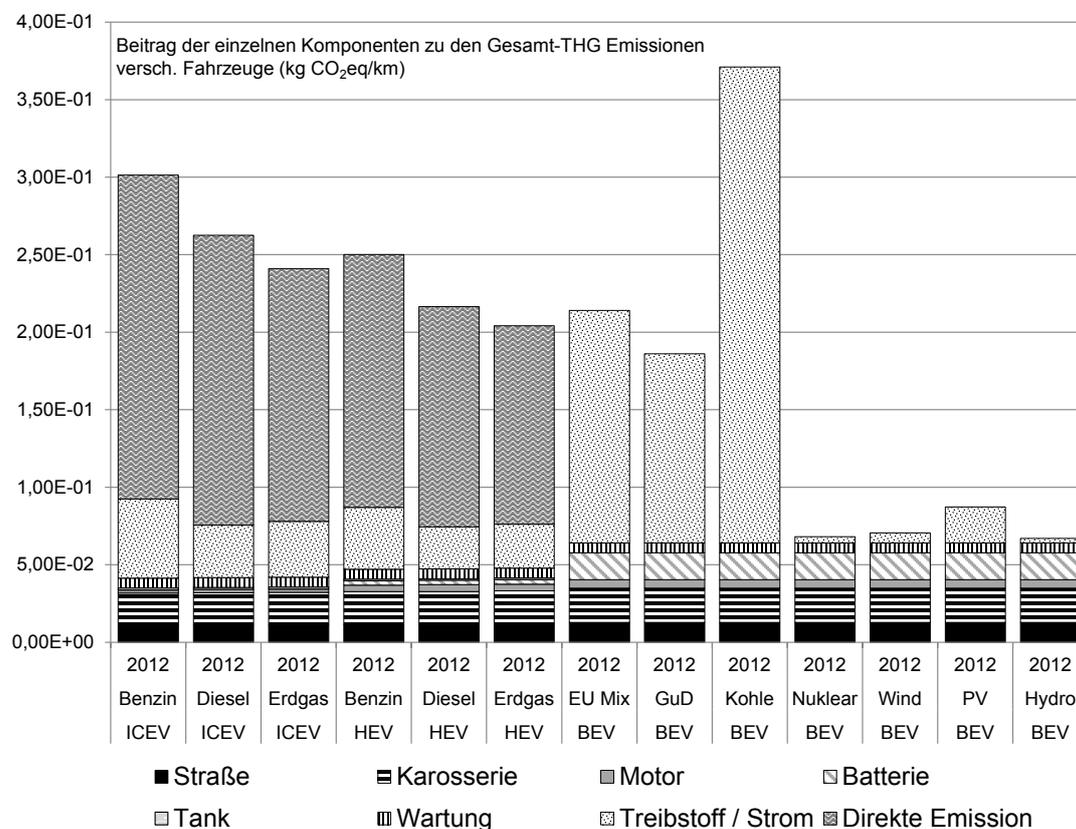
Normalisiert auf die jährlich in der Europa entstehenden Umweltauswirkungen

- ADP: Ressourcenverarmungspotenzial
- AP: Versauerungspotenzial
- EP: Eutrophizierungspotenzial
- GWP: Treibhausgasemissionen
- HTP: Humantoxizitätspotenzial
- ODP: Ozonverarmungspotenzial

Quelle: Eigene Darstellung

Obwohl Li-Ionen-Batterien bereits in industriellem Maßstab produziert werden, gibt es dennoch einen latenten Mangel an Daten zu den entsprechenden Produktionsprozessen. Hersteller geben ungern Details über Energieverbrauch, Zu-

**Abb. 2: CO<sub>2</sub>-Emissionen von konventionellen (ICEV), Hybriden (HEV) und Batteriefahrzeugen (BEV) mit unterschiedlichem Treibstoff bzw. Ladestrom unterschiedlichen Ursprungs**



EU-Mix: derzeitiger Strommix in der EU

PV: Photovoltaik

GuD: Erdgas Gas-und-Dampf Kraftwerk

Hydro: Wasserkraft

Quelle: Bauer et al. 2015, eigene Darstellung

sammensetzung und genaue Produktionsabläufe preis, weshalb sich bestehende Studien immer mit Abschätzungen und Annäherungen zufriedengeben müssen. Entsprechend hoch sind die Unsicherheiten, was sich auch in der Varianz der Ergebnisse, zu denen die unterschiedlichen Studien kommen, widerspiegelt.

## 2.2 Nutzungsphase von Energiespeichern

Die Nutzungsphase ist der Teil des Lebenszyklus mit dem mit Abstand höchsten Einfluss auf die Umweltauswirkungen von Elektromobilität (Faria et al. 2013; Nordelöf et al. 2014; Notter et al. 2010). Vor allem die Herkunft der Elektrizität ist dabei ein Schlüsselfaktor. Ein auf überwiegend fossilen Energieträgern basierender Strommix bringt dabei wenig Vorteile oder sogar Nachteile

im Vergleich mit einem modernen effizienten Verbrennungsmotor (Bauer et al. 2015; Hawkins et al. 2012; Nordelöf et al. 2014). Je höher der Anteil an regenerativ erzeugtem Strom, welcher für das Laden der Batterien verwendet wird, desto höher der Umweltvorteil<sup>3</sup>. Abbildung 2 veranschaulicht dieses durch Gegenüberstellung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von konventionellen und von Elektrofahrzeugen, die mit Strom aus verschiedenen Elektrizitätserzeugungsarten geladen werden. Allerdings ist die für den Fahrzeugantrieb benötigte Energie in erster Linie ein Fahrzeugparameter und nicht batterieabhängig. Darüber hinaus gibt es jedoch noch weitere, batteriebezogene Parameter, wie interne Lade-/Entlade-Effizienz, spezifische Energiedichte (und damit Batteriegewicht für eine gegebene Kapazität) oder die Batteriebensdauer, welche

sich ebenfalls in der Gesamtbilanz niederschlagen, aber oft vernachlässigt werden.

Im Folgenden werden Faktoren genauer diskutiert, die einen starken Einfluss auf die Ergebnisse einer Lebenszyklusanalyse haben.

### *Lebensdauer*

Die Herstellung der Batterien ist mit hohen Umweltauswirkungen und Energieverbrauch verbunden. Eine kurze Lebensdauer kann sich auf die lebenszyklusbezogenen Umweltauswirkungen des Fahrzeugs sehr negativ auswirken, wenn beispielsweise eine Batterie vor Ende des Fahrzeuglebens ersetzt werden muss, sodass nun die Produktion zweier Batterien auf ein Fahrzeug kommt. Unterschiedliche Batterietypen können sehr verschiedene Lebensdauern haben, und es ergeben sich deutliche Unterschiede, wenn die über die gesamte Lebensdauer bereitgestellte Kapazität betrachtet wird. Eine Mittelung über alle Batterietypen gibt dabei ein stark vereinfachtes Bild, ist aber hilfreich, um die Größenordnungen aufzuzeigen. Im Schnitt über alle Batterietypen beläuft sich der aus der Batterieproduktion resultierende kumulative Energieaufwand (KEA) für die Speicherung von 1 kWh über die gesamte Batterielebensdauer auf 0,26 kWh, d. h. auf rund ein Viertel. Die entsprechenden THG-Emissionen sind 84g CO<sub>2</sub>eq pro kWh, oder rund 18 % der für die Erzeugung einer kWh an Strom anfallenden Emissionen (EU-Strommix aus 2008). Bei längerer Batterielebensdauer reduzieren sich diese Werte entsprechend. Dieser Abschätzung liegen eine durchschnittliche Entladetiefe von 80 % sowie eine Batterieeffizienz von 90 % zugrunde.

### *Batterieeffizienz*

Die Lade-/Entladeeffizienz der Batterie bestimmt den Anteil der elektrischen Energie, der bei jedem Lade-/Entladezyklus in Form von Wärme verloren geht. Bestehende Studien gehen von einer Effizienz von 90 % aus, wobei jedoch gängige Batterien, abhängig vom Typ, Werte über 93 % aufweisen können (Stenzel et al. 2014). Für eine interne Effizienz von 90 % wäre der KEA für die Speicherung von 1 kWh Strom ca. 0,3 kWh

und die entsprechenden THG-Emissionen 46,7 g CO<sub>2</sub>eq. Diese Werte sind in einer vergleichbaren Größenordnung wie die (anteilmäßig über die Lebensdauer) durch die Produktion verursachten. Folglich können die mit der Batterie unmittelbar assoziierten Umweltauswirkungen durch Verbesserung des Batteriewirkungsgrades in der gleichen Größenordnung reduziert werden wie durch eine proportionale Erhöhung der Zykluslebensdauer oder die entsprechende Reduktion der Energieintensität des Produktionsprozesses selbst.

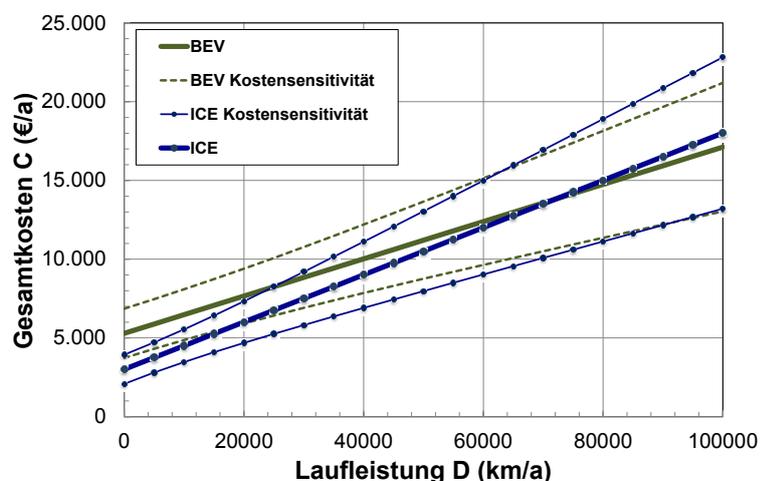
### *Energiedichte*

Die Erhöhung der spezifischen Energiedichte oder Kapazität ist eines der primären Ziele der Batterieforschung, da in Elektrofahrzeugen die Batterie einen wesentlichen Anteil am Fahrzeuggewicht hat. Auch ohne eine detaillierte Berechnung kann die Auswirkung einer veränderten Energiedichte auf das Batterie- und damit das Fahrzeuggewicht grob bestimmt, und daraus für den gegebenen Fahrzyklus der geänderte Energieverbrauch ermittelt werden. Eine Erhöhung der Energiedichte um z. B. 50 % von 160 auf 240 Wh·kg<sup>-1</sup> würde auf dieser Basis eine Reduktion des Energieverbrauchs zwischen 2 und 5 % bedeuten (Lewis et al. 2014), und somit eine Reduktion des KEA um 0,06 bis 0,15 kWh pro kWh an von der Batterie zur Verfügung gestellter Energie. Eine Reduktion der Energiedichte um die Hälfte auf 80 Wh·kg<sup>-1</sup> erhöht andererseits den KEA um 0,24 bis 0,45 kWh pro kWh. Dies sind Werte in der gleichen Größenordnung wie die zuvor bei Betrachtung des Einflusses von Batterieeffizienz und Lebensdauer erhaltenen. Folglich muss die spezifische Energiedichte nicht unbedingt relevanter sein als andere Parameter wie die Zykluslebensdauer oder die Batterieeffizienz. Letztere könnten sogar einen höheren Einfluss auf die gesamten Umweltauswirkungen eines Elektrofahrzeuges haben als das zusätzliche Gewicht aufgrund der Traktionsbatterie (Zackrisson et al. 2010).

Die Abschätzungen zur Umweltauswirkung von Li-Ionen-Batterien in diesem Kapitel basieren auf veröffentlichten Lebenszyklusstudien (Peters et al. 2015). Die Werte sind dementsprechend Durchschnittswerte und variieren, insbesondere für die Batterieproduktion, stark zwischen ver-

schiedenen Batterietypen. Das Einbeziehen der Zykluslebenszeit relativiert dies teilweise und ermöglicht einen Vergleich von Batterietypen mit sehr unterschiedlicher Lebensdauer. Dadurch kann ein sehr anschauliches Bild von den Größenordnungen und auch der Relevanz verschiedener Schlüsselparameter vermittelt werden. Bezüglich letzterer zeigt sich, dass sich diese alle in vergleichbaren Größenordnungen bewegen, und dass damit durch Weiterentwicklung eines jeden Aspekts eine ähnliche Verbesserung der Ökobilanz erreicht werden kann. In allen Fällen hat die Batterieproduktion einen wesentlichen Anteil an den Umweltauswirkungen, jedoch relativiert sich dieser, wenn nicht nur die unmittelbar mit dem Batteriebetrieb verbundenen Auswirkungen betrachtet werden (interne Verluste oder zusätzlicher Verbrauch durch Batteriegewicht), sondern auch die für die Fortbewegung selbst benötigte Energie. In diesem Fall werden der Energieverbrauch sowie die THG-Emissionen von der Nutzungsphase dominiert. Ganzheitlich gesehen ist somit nicht die Batterie selbst, sondern die Versorgung mit erneuerbar erzeugtem Ladestrom mit geringen Umweltauswirkungen das oberste Gebot für eine nachhaltige Elektromobilität.

**Abb. 3: Kostenanalyse verschiedener Fahrzeuge in Abhängigkeit der Laufleistung**



BEV: Batterieelektrische Fahrzeuge  
ICE: Fahrzeug mit Verbrennungsmotor

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Fournier et al. 2015

### 3 Kostenbetrachtungen von Batterien und batterieelektrischen Fahrzeugen

Die Lebenszykluskosten eines rein batteriebetriebenen Fahrzeuges aus der Nutzerperspektive (Total Cost of Ownership – TCO) hängen neben der Investition von den Nutzungs-, Unterhalts- und den Entsorgungskosten-, bzw. Recyclingkosten ab. Letztere sind in der Regel schon in den Investitionskosten (Kaufpreis) enthalten.

Gegenwärtig können rein elektrische Fahrzeuge<sup>4</sup> gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in den meisten Fällen zwar deutliche Umweltvorteile aufweisen, allerdings nur in den seltensten Fällen Kostenvorteile (ADAC 2014; Dura et al. 2012; FFE 2011). Letzteres ist insbesondere dann der Fall, soweit selbst erzeugte Energie (z. B. durch Photovoltaik) für die Ladung der Batterie genutzt wird (zur Reduktion der Nutzungskosten) und/oder durch rationale Wahl der Fahrzeuggröße, die sich an den vorrangigen Nutzungszwecken orientiert (Dura et al. 2012). Dennoch kann festgehalten werden, dass in der großen Mehrzahl der Nutzungsfälle mit höheren Lebenszykluskosten für Elektrofahrzeuge zu rechnen ist, soweit nicht der Kauf eines solchen Fahrzeugs vom Staat nennenswert subventioniert wird, wie z. B. in Norwegen (Handelsblatt 2015).

Ursächlich für die hohen Lebenszykluskosten ist der hohe Anschaffungspreis für E-Fahrzeuge, der von 30 % bis zu 120 % über einem vergleichbaren konventionellen Fahrzeug liegt (ADAC 2014). Dies bedeutet, dass aus Sicht eines Nutzers die höheren Investitionskosten nur durch die geringeren Nutzungskosten pro km kompensiert werden können. Demzufolge würde man nur Kostenvorteile durch hohe Laufleistungen des Elektrofahrzeuges erreichen können. In zwei unterschiedlichen Fällen von Fahrzeugen mit einer Li-Ionen-Batterien werden hierbei der Break-Even-Punkt der Laufleistung, der Punkt also, ab dem das Elektrofahrzeug Kostenvorteile gegenüber dem konventio-

nellen Fahrzeug aufweist, mit ca. 160.000 bzw. 300.000 km berechnet (Jambor/Heinrich 2014; Quodt 2015). Eine optimistischere Studie sieht diesen Punkt bereits für Batteriefahrzeuge bei ca. 70.000 km Laufleistung als erreicht (Abb. 3), soweit nicht noch Effekte durch die Fremdnutzung der Batterie im Fahrzeug für Netzzwecke berücksichtigt werden (Fournier et al. 2015). Allerdings sind derartige Berechnungen auch immer mit hohen Unsicherheiten behaftet, weshalb sich sehr hohe Abweichungen ergeben können.

Neben den Entwicklungskosten für Elektrofahrzeuge sind die Batteriekosten ein wesentlicher Faktor für den deutlich höheren Preis von Elektrofahrzeugen (EWI 2010; VDE 2010). Es gibt jedoch zahlreiche Hinweise, dass die Kosten für elektrochemische Speicher sowohl für eine spezifische Zellchemie und Geometrie, aber auch durch die Einführung neuer Speichertechnologien (z. B. Li-S) in der Zukunft stark sinken könnten.

In einer aktuellen Metastudie (Nykvist/Nilsson 2015) wurden 80 Veröffentlichungen ausgewertet, die nach 2007 entstanden sind und sich auf die Preisentwicklung von Li-Batterien fokussieren. Dabei wurden nicht nur wissenschaftliche Publikationen herangezogen, sondern auch Quellen aus Industrie- und Branchenkreisen sowie in den Medien dokumentierte Aussagen von Firmenvertretern wie z. B. Tesla, BMW, Nissan oder Mitsubishi. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass möglicherweise die Kosten

von Batterien bereits in der Vergangenheit überschätzt wurden und dass in der Zukunft mit deutlichen Kostenreduktionen zu rechnen ist. Lagen die Preise für Lithium-Batteriezellen im Jahr 2014 noch bei durchschnittlich 410 Dollar (ca. 370 Euro) pro kWh Speicherkapazität, so könnten bei gleichbleibender Entwicklung bereits in drei Jahren Kosten von ca. 225 Dollar (200 Euro) pro kWh erreicht werden. Ferner könnte die magische Batteriekosten-Grenze<sup>5</sup> von 150 Dollar (ca. 135 Euro), die Grenze ab der batteriebetriebene Fahrzeuge als preislich ebenbürtig zur konventionellen Konkurrenz gelten, in relativ naher Zukunft unterschritten werden (Nykvist/Nilsson 2015). Eine ebenfalls aktuell veröffentlichte Studie bestätigt diese Analyseergebnisse (Lux Research 2015). Bei den sinkenden Kostentrends scheinen Nissan und insbesondere Tesla eine ausgesprochene Vorreiterrolle einzunehmen.

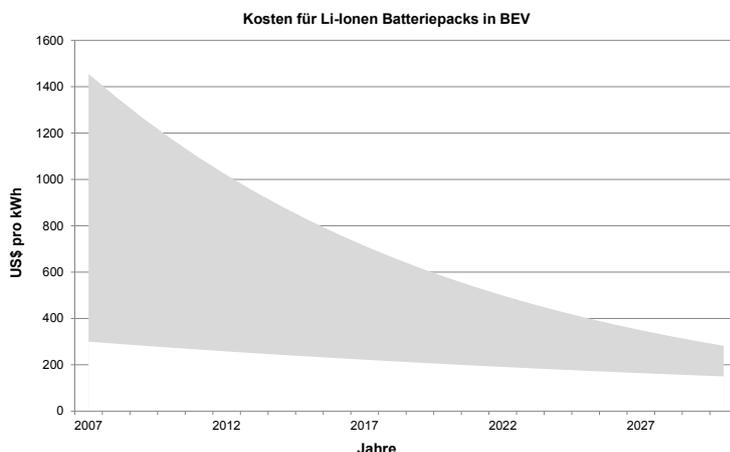
In einer stark vereinfachten Darstellung (Abb. 4) ist die Bandbreite der Kosten und Kostenentwicklung für Li-Batterien bis ins Jahr 2030 basierend auf der Studie von Nykvist und Nilsson (2015) dargestellt.

#### 4 Diskussion und Zusammenfassung

Für eine nachhaltigere Gestaltung des Energie- und Mobilitätssektors haben die Energiespeicher eine große Bedeutung. Deshalb ist es verständlich, dass große Hoffnungen auf die schnelle Entwicklung von leistungsfähigen, kostengünstigen und nicht zuletzt umweltverträglichen Energiespeichern ruhen. Unter diesem hohen Erwartungsdruck wagen einzelne Vertreter der Industrie große Versprechungen hinsichtlich der zukünftigen Batterieentwicklungen, die durch die Medienberichterstattung weiterhin verstärkt werden. Wie die Erfahrung jedoch zeigt, wurden die Möglichkeiten unterschiedlicher Batterie-technologieentwicklungen bereits in der Vergangenheit oft überschätzt, insbesondere hinsichtlich der zeitlichen Entwicklungszyklen. So steht der oft gebetsmühlenartig prokla-

menten der zukünftigen Batterieentwicklungen, die durch die Medienberichterstattung weiterhin verstärkt werden. Wie die Erfahrung jedoch zeigt, wurden die Möglichkeiten unterschiedlicher Batterie-technologieentwicklungen bereits in der Vergangenheit oft überschätzt, insbesondere hinsichtlich der zeitlichen Entwicklungszyklen. So steht der oft gebetsmühlenartig prokla-

**Abb. 4: Bandbreite der Preise und Preisentwicklung für Li-Batterien für vollelektrische Batteriefahrzeuge**



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Nykvist/Nilsson 2015

mierten disruptiven Innovation (der Speichertechnologie) eine tatsächlich zeitintensive Erarbeitung inkrementeller Entwicklungsschritte gegenüber.

Herangezogene Metastudien zur Abschätzung der Kostenentwicklung von Traktionsbatterien, auch unter Einbeziehung oben genannter Industrievertreter, zeigen starke Kostenreduktionspotenziale, die sich wiederum in Kostenvorteilen von Elektrofahrzeugen niederschlagen können. Ob diese optimistischen Erwartungen in einem stark umkämpften Markt für die zünftige Mobilität (auch in Konkurrenz zu Wasserstofffahrzeugen oder Fahrzeugen mit synthetischen Kraftstoffen) eher einem Wunsch als möglicher Realität entsprechen, kann nicht abschließend bewertet werden. Dies liegt insbesondere daran, dass die Entwicklung der Batterietechnologie sektorenübergreifend (stationär, mobil, portabel) stattfindet und somit von unterschiedlichen Stakeholder-Gruppen beeinflusst wird (Baumann et al. 2015).

Auch könnte es durch eine elektrische Massenmobilität zu einer Ressourcenverknappung in der Batterieproduktion kommen (Weil/Ziemann 2014), welche wiederum negative Auswirkungen auf die Kostensenkungspotenziale hätte. Der aktuelle Trend der Konzentration der Batteriezellproduktion in Asien könnte sich ebenfalls negativ auf den Preis für Batteriezellen auswirken.

Doch selbst wenn Elektrofahrzeuge in naher Zukunft keinen klaren Kostenvorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen erreichen, sollten die gezeigten Umweltvorteile Grund genug sein, diese Technologie (aber auch andere nachhaltige Mobilitätstechnologien) stärker zu fördern als bislang. Hier kann Norwegen als mögliches Vorbild in Europa dienen.

### Anmerkungen

- 1) Hier gibt es bereits eine kleine Firma in England: OxisEnergy (<http://www.oxisenergy.com>).
- 2) Vgl. zu Batteriesystemen auch den Beitrag von Oertel et al. in diesem Heft.
- 3) Deshalb sollten für die Bewertung von Elektrofahrzeugen auch prospektive, zeitaufgelöste Ökobilanzen herangezogen werden (Zimmermann et al. 2014).

- 4) Hybridfahrzeuge werden in den weiteren Ausführungen nicht weiter betrachtet. Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge sind in der Regel 30-50 % teurer als Hochenergiebatterien (Nykvist/Nilsson 2015).
- 5) In Blesl et al. (2009) wird diese Grenze für ein Mittelklassefahrzeug bei weniger als 100 Euro gezogen, ohne Berücksichtigung der Kraftfahrzeugsteuer.

### Literatur

- ADAC – Allgemeiner Deutsche Automobil-Club e.V., 2014: Wie rentable sind Elektroautos. Infografik 12/2014; <https://presse.adac.de/meldungen/technik/autokostenvergleich-elektroautos.html>
- Bauer, C.; Hofer, J.; Althaus, H.-J. et al., 2015: The Environmental Performance of Current and Future Passenger Vehicles: Life Cycle Assessment Based on a Novel Scenario Analysis Framework. In: Applied Energy 157 (2015), S. 871–883
- Baumann, M.; Zimmermann, B.; Boavida, N. et al., 2015: Technology Transition Pathways Towards Electric Mobility: The Reconfiguration of Stakeholder Networks and Impact on Battery Development. Vortrag auf dem Gerpisa International Colloquium 2015. Paris
- Blesl, M.; Bruchof, D.; Hartmann, N. et al., 2009: Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität. Endbericht. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung. Stuttgart
- Dunn, J.B.; Gaines, L.; Kelly, J.C. et al., 2015: The Significance of Li-ion Batteries in Electric Vehicle Life-cycle Energy and Emissions and Recycling's Role in its Reduction. In: Energy Environmental Science 8 (2015), S. 158–168
- Dura, H.; Weil, M.; Aebi, A., 2012: Comparative LCA of an Electric Light Weight and Conventional Vehicle in Urban Driving. Vortrag beim SETAC Europe 18<sup>th</sup> LCA Case Study Symposium. Kopenhagen, 26.–28.11.12
- EC – European Commission, 2009: Directive 2009/28/EC on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources. Brüssel
- EC-JRC – European Commission Joint Research Centre, 2010: ILCD Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. Ispra, Institute for Environment and Sustainability
- EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, 2010: Potenziale der Elektromobilität bis 2050 – Eine szenarienbasierte Analyse der Wirt-

schaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration. Endbericht. Köln

*Faria, R.; Marques, P.; Moura, P. et al.*, 2013: Impact of the Electricity Mix and Use Profile in the Life-cycle Assessment of Electric Vehicles. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24 (2013), S. 271–287

*FAZ – Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 2015: Ende einer Weltrekordfahrt; <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/elektroautos-ermittlungen-gegen-erfinder-mirko-hannemann-13538137.html>

*FFE – Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.*, 2011: eFlott – Wissenschaftliche Analysen zur Elektromobilität. Endbericht

*Fournier, G.; Baumann, M.; Dittes, S. et al.*, 2015: V2G und P2G als Bindeglied zwischen Erneuerbaren Energien und zukünftiger Individualmobilität. In: Proff, H. (Hg.): *Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*. Wiesbaden, S. 115–128

*Guinee, J.; Gorrée, M.; Heijungs, R. et al.*, 2001: *Life Cycle Assessment – An Operational Guide to the ISO Standards*. Leiden

*Handelsblatt*, 2015: Elektroauto-Boom dank staatlicher Förderung. 22.08.2015; <http://www.handelsblatt.com/auto/nachrichten/norwegen-elektroauto-boom-dank-staatlicher-foerderung/12211510.html>

*Hawkins, T.R.; Gausen, O.M.; Strømman, A.H.*, 2012: Environmental Impacts of Hybrid and Electric Vehicles – A Review. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (2012), S. 997–1014

*ISO – International Organization for Standardization*, 2006a: ISO 14040 – Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. Genf

*ISO – International Organization for Standardization*, 2006b: ISO 14044 – Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. Genf

*Jambor, A.; Heinrich, Ch.*, 2014: Die Spannung steigt. In: *DIE ZEIT* 29 (2014); <http://www.zeit.de/2014/29/elektroautos-anzahl>

*Kammerhoff, M.*, 1910: *Der Edisonakkumulator. Seine technischen und wirtschaftlichen Vorteile gegenüber der Bleizelle*. Berlin

*Lewis, A.M.; Kelly, J.C.; Keoleian, G.A.*, 2014: Vehicle Lightweighting vs. Electrification: Life Cycle Energy and GHG Emissions Results for Diverse Powertrain Vehicles. In: *Applied Energy* 126 (2015), S. 13–20

*Lux Research*, 2015: *Crossing the Line: Li-ion Battery Cost Reduction and Its Effect on Vehicles and*

*Stationary Storage* 03/2015; [http://www.luxresearchinc.com/sites/default/files/ES%20KTA\\_3\\_15.pdf](http://www.luxresearchinc.com/sites/default/files/ES%20KTA_3_15.pdf) (download 19.11.15)

*Nordelöf, A.; Messagie, M.; Tillman, A.-M. et al.*, 2014: Environmental Impacts of Hybrid, Plug-in hybrid, and Battery Electric Vehicles – What Can We Learn from Life Cycle Assessment? In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 19 (2014), S. 1866–1890

*Notter, D.A.; Gauch, M.; Widmer, R. et al.*, 2010: Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. In: *Environmental Science and Technology* 44 (2010), S. 6550–6556

*Nykqvist, B.; Nilsson, M.*, 2015: Rapidly Falling Costs of Battery Packs for Electric Vehicles. In: *Nature Climate Change* 5 (2015), S. 329–332

*Peters, J.F.; Baumann, M.; Zimmermann, B. et al.*, 2015: The Environmental Impact of Li-Ion Batteries and the Role of Key Parameters – A Review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (submitted)

*Quodt, A.*, 2015: Unser Smart Electric Drive rechnet sich schon nach 32,85 Jahren. In: *Lightlife* 18.6.15; <http://www.lightlife.de/unser-smart-electric-drive-rechnet-sich-schon-nach-3285-jahren/>

*Rangaraju, S.; De Vroey, L.; Messagie, M. et al.*, 2015: Impacts of Electricity Mix, Charging Profile, and Driving Behavior on the Emissions Performance of Battery Electric Vehicles: A Belgian Case study. In: *Applied Energy* 148 (2015), S. 496–505

*Ritthoff, M.; Schallaböck, K.O.*, 2012: *Ökobilanzierung der Elektromobilität. Themen und Stand der Forschung. Teilbericht Ökobilanzierung*. Wuppertal

*Simon, B.; Weil, M.*, 2013: Analysis of Materials and Energy Flows of Different Lithium Ion Traction Batteries. In: *Revue de Métallurgie* 110 (2013), S. 65–76

*Spiegel*, 2010: 600 Kilometer ohne Nachladen: E-Auto schafft Reichweiten-Rekord; <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/600-kilometer-ohne-nachladen-e-auto-schafft-reichweiten-rekord-a-725418.html>

*Spiegel*, 2015: Flusszellen-Batterie für E-Mobile: Elektro-Pop; <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/neue-batterietechnik-unternehmen-verspricht-extreme-e-auto-reichweite-a-1018760.html>

*Stenzel, P.; Baumann, M.; Fleer, J. et al.*, 2014: Database Development and Evaluation for Techno-Economic Assessments of Electrochemical Energy Storage Systems. In: *Energy Conference (ENERGYCON)* (2014), S. 1334–1342

*Thielmann, A.; Isenmann, R.; Wietschel, M.*, 2010: *Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030*.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

*VDE – Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.*, 2010: Elektrofahrzeuge – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. Frankfurt a. M.

*Weil, M.; Ziemann, S.*, 2014: Recycling of Traction Batteries as a Challenge and Chance for Future Lithium Availability. In: Pistoia, G. (Hg.): Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications. Amsterdam, S. 509–528

*Zackrisson, M.; Avellán, L.; Orlenius, J.*, 2010: Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles – Critical Issues. In: Journal of Cleaner Production 18 (2010), S. 1519–1529

*Zimmermann, B.; Dura, H.; Baumann, M. et al.*, 2014: Prospective Time-resolved LCA of Fully Electric Supercap Vehicles in Germany. In: Integrated Environmental Assessment and Management (2015); publ. online, DOI: 10.1002/ieam.1646

## Kontakt

Dr.-Ing. Marcel Weil  
 Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)  
 Helmholtz-Institut Ulm (HIU)  
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
 Karlstraße 11, 76133 Karlsruhe  
 Tel.: +49 721 608-26718  
 E-Mail: [marcel.weil@kit.edu](mailto:marcel.weil@kit.edu)

« »

## Stand und Perspektiven von Redox-Flow-Batterien als stationäre Speicherlösungen

von Jens Tübke, Jens Noack und Lars Wietschel, Fraunhofer-Institut Chemische Technologie (ICT), Pfinztal

**Deutschland betreibt mit Nachdruck den Ausbau der erneuerbaren Energien. Für eine sichere und auch effiziente Energieversorgung muss sowohl die Energiebereitstellung, insbesondere mit dem Hintergrund fluktuierender Einspeisung, aber auch der Energieverbrauch zeitlich und örtlich ausgleichbar sein. Heute wird diese Aufgabe zu einem großen Teil von den Stromnetzen übernommen, allerdings verfügen diese über keine Speicherkapazitäten, um Schwankungen in der Energieversorgung auszugleichen. Elektrochemische Speicher oder auch Batterien gehören zu den etablierten Technologien zur Speicherung elektrischer Energie und werden in diesem Kontext bereits vielfältig, zum Beispiel als Notstromversorgung zur unterbrechungsfreien Stromversorgung, eingesetzt. Die Speicherung elektrischer Energie mit Hilfe elektrochemischer Speicher im höheren Kilowatt (kWh)- bis Megawatt (MWh)-Maßstab ist heute noch nicht wirtschaftlich darstellbar, u. a. auch, weil die heute noch zu hohen Speicherkosten ab einer bestimmten Größe nahezu proportional zur installierten Kapazität ansteigen. Dieses grundsätzliche Problem ließe sich mit dem Einsatz von Redox-Flow-Batterien (RFB) teilweise lösen. Nachfolgend werden RFB hinsichtlich ihrer elektrochemischen Eigenschaften und Entwicklungspotenziale diskutiert und eine Einschätzung zu möglichen Kostenreduktionspotenzialen gegeben.**

*Germany is emphatically pursuing the extension of renewable energy. For a safe and efficient energy supply the provision of energy, especially against the background of fluctuating input as well as the local and temporal use of energy has to be balanced. This is mainly done today by the power grids, yet these don't have storage capacities to stabilize fluctuations. Electrochemical storage devices or batteries are among the established technologies for storage of electric energy and are versatilely used, such as for uninterruptible power supply.*