

Elektrisch mobil und nachhaltig

Wann sind Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge und regenerative Energiespeicher wirtschaftlich?

Olaf Wollersheim und Andreas Gutsch

Fossile Rohstoffe schwinden, doch Verkehr und Energieverbrauch wachsen. Daher ist es dringend notwendig, eine nachhaltige Mobilität zu etablieren und den Ausbau regenerativer Energiequellen voranzutreiben. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist die Speicherung elektrischer Energie. Ein Durchbruch kann dabei aber nur bei Anwendungen gelingen, bei denen technische Eignung und wirtschaftliche Attraktivität zusammenkommen.

Wo elektrische Energie wirtschaftlich verfügbar ist, wird sie auch genutzt: Deutsche Haushalte kochen zu 85 Prozent elektrisch. In Ländern mit preisgünstigem Strom wie Norwegen, Frankreich oder den USA heizen die Einwohner ihre Häuser überwiegend elektrisch. Auch bei der Mobilität hat sich der elektrische Antrieb z. B. beim Bahnverkehr durchsetzen können. Doch fossile Energieträger für den Verkehr und zur Erzeugung elektrischer Energie zu nutzen, ist langfristig ökonomisch wie ökologisch inakzeptabel. Darauf wies auch die DPG 2005 mit ihrer Energiestudie hin [1] und untersuchte in den Folgejahren detailliert die wissenschaftlichen und technischen Randbedingungen für einen Umbau der elektrischen Energieversorgung [2]. Beim Individualverkehr lässt sich die elektrische Energie nicht wie bei der Bahn über Oberleitung oder Stromschiene zuführen. Daher sind leistungsfähige mobile Energiespeicher nötig. Mit Strom aus regenerativen Quellen stellen Elektrofahrzeuge eine der wenigen bekannten Möglichkeiten für eine potenziell emissionsfreie Individualmobilität dar, vorausgesetzt, man lässt die Emissionen bei Herstellung und Wartung außer Acht.

Welche Anforderungen stellt ein elektrisches Fahrzeug an einen mobilen Energiespeicher? Aus physikalischer Sicht muss der Speicher ausreichend Energie und Leistung bereitstellen. Eine typische Fahrzeugbatterie, die heute diese Anforderungen erfüllt, wiegt 150 Kilogramm und hat ein Volumen von 200 Liter. Angesichts des begrenzten Fahrzeugaums und der mit der Masse wachsenden Energieverluste sind die Energie- und Leistungsdichte sowie die auf die Masse der Batterie bezogene spezifische Energie und Leistung die kritischen Größen.

Im Hinblick auf diese Größen sind bei wiederaufladbaren Batterien in den letzten 20 Jahren bedeutende Fortschritte zu verzeichnen. Dabei waren tragbare



Bei diesem Elektrofahrzeug lässt sich Energie in beide Richtungen zwischen Stromnetz und Fahrzeugbatterie austauschen. Das Fahrzeug lädt sich also aus dem Netz auf, kann aber auch Energie in das Netz zurückspeisen.¹⁾

elektronische Geräte die Schrittmacher: Smartphones, Digitalkameras, Notebooks, elektrische Handwerkzeuge, aber auch Staubsauger und Rasenmäher lassen sich netzunabhängig betreiben. In Anbetracht der mittlerweile erreichten Werte für verschiedene Arten elektrochemischer Speicher (Abb. 1), eignen sich heute für reine Elektrofahrzeuge ausschließlich Lithium-Ionen-Batterien (Infokasten). Damit können Elektrofahrzeuge heutzutage etwa 100 bis 150 Kilometer zurücklegen.

Zu den grundlegenden physikalischen Anforderungen kommen ingenieurtechnische hinzu, etwa in Bezug auf die Elektrik oder die Sicherheit. Über die typische Nutzungsdauer muss das Fahrzeug wirtschaft-

¹⁾ Dieses Fahrzeug ist Teil des vom BMWi geförderten Forschungsprojekts MeRegioMobil: <http://meregiomobil.forschung.kit.edu>

KOMPAKT

- In den letzten 20 Jahren wurden leistungsfähige Lithium-Ionen-Batterien entwickelt, die ein breites Anwendungsspektrum abdecken.
- Im Bereich der Mobilität lohnt sich ein elektrischer Antrieb vor allem für Fahrzeuge, die hohe jährliche Laufleistungen im innerstädtischen Verkehr haben.
- In stationären Anwendungen ist es auf sonnenreichen Inseln besonders wirtschaftlich, Solarstrom dezentral zu erzeugen und zwischenzuspeichern.
- Die zahlreichen Nebenbedingungen für wirtschaftliche Batteriesysteme erfordern jeoch noch viele Innovationen.

Dr. Olaf Wollersheim und Dr. Andreas Gutsch, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Projekt Competence E, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

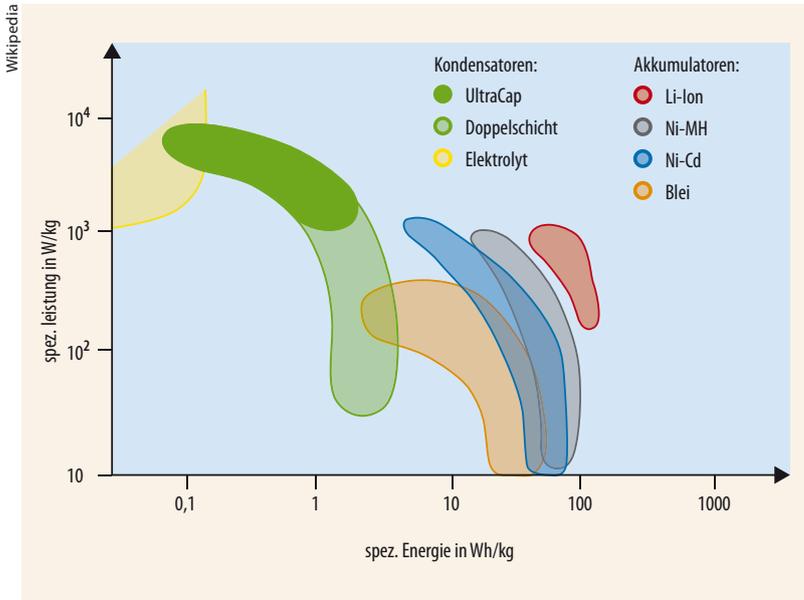


Abb. 1 In diesem so genannten Ragone-Diagramm ist die spezifische Leistung über der spezifischen Energie für verschiedene Arten elektrochemischer Speicherung elektrischer Energie aufgetragen.

lich mindestens mit dem herkömmlichen Antrieb konkurrieren können. Daher ist es sinnvoll, vorrangig Situationen zu betrachten, bei denen der Verbrennungsmotor besonders hohe Kosten verursacht. Da die Treibstoffkosten in dem Fall die Gesamt-Fahrzeugkosten dominieren, ist es gleichzeitig von hohem ökologischem Wert, konventionelle Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge zu ersetzen, sofern der Strom aus regenerativen Quellen stammt.

Ein besonders hoher Treibstoffverbrauch tritt immer dann auf, wenn Verbrennungsmotoren instationär, unter stark schwankenden Lastprofilen, also häufig im Teillastbetrieb arbeiten und dabei große träge Massen beschleunigen müssen. Solche Zustände treten besonders häufig bei innerstädtischen Fahrten auf. Wir wollen deshalb unsere physikalische Analyse mit dem innerstädtischen Anteil des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) beginnen, der in Europa für die objektive Bewertung des Kraftstoffverbrauchs dient.²⁾ Durch zeitliches Ableiten lassen sich die auftretenden Beschleunigungen berechnen und – mit eini-

2) Der NEFZ besteht aus vier Stadtfahrten und einer Überlandfahrt. Die Fahrzeit beträgt insgesamt 20 Minuten. Ein Stadtzyklus besteht aus vier Konstantfahrten mit jeweils 15, 32, 40 und 50 km/h. Ampelphasen mit großen Stopp/Startanteilen sind ebenfalls berücksichtigt.

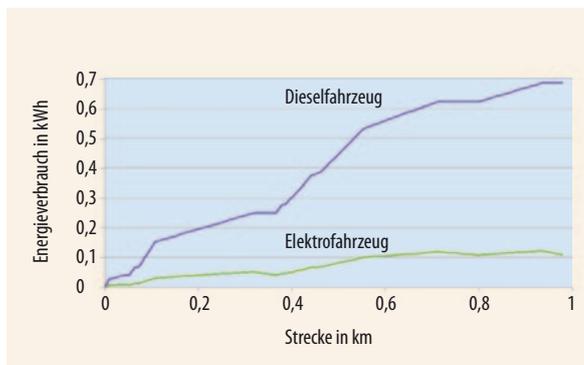


Abb. 2 Der Gesamtenergieverbrauch für ein konventionelles Dieselfahrzeug (4 Türen, 2 Liter-TDI-Motor, 1600 kg) liegt beim Durchfahren des „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ) deutlich über dem Verbrauch eines vergleichbaren Elektrofahrzeugs.

gen zusätzlichen Annahmen über innere und äußere Reibungsverluste, den Luftwiderstandsbeiwert und die Fahrzeugmasse – in den Energiebedarf für das Durchlaufen dieses Fahrzyklus umrechnen. Beim Elektrofahrzeug wirkt der Motor auch als elektromotorische Bremse: Die kinetische Energie beim Bremsen lässt sich teilweise wieder in elektrische Energie umwandeln und in die Fahrbatterie zurückspeisen. Dies nennt man Rekuperation (von lat. *recuperare* für „wiedererlangen“). Stellt man den Gesamtenergieverbrauch für ein konventionelles Dieselfahrzeug dem Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs gegenüber, zeigt sich ein erheblicher, mit der Fahrstrecke zunehmender Verbrauchsvorteil des Elektrofahrzeugs (Abb. 2). Das ist auf zwei Haupteffekte zurückzuführen:

■ Der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs ist mit bis zu 85 % um ein Mehrfaches höher als der des konventionellen Antriebs mit Verbrennungsmotor.

■ Das Elektrofahrzeug fährt aufgrund der Rekuperation signifikante Strecken ohne Nettoenergieverbrauch.

Entsprechend wäre schon mit einer Batteriekapazität von rund 5 kWh die durchschnittliche Tagesfahrleistung von 40 bis 50 Kilometern eines deutschen privaten PKW im innerstädtischen Fahrbetrieb abgedeckt. Mit dem Strom- und Energieverbrauch und Annahmen über die Kosten fossiler Treibstoffe lässt sich der Verbrauchsvorteil des Elektrofahrzeugs in einen Kostenvorteil gegenüber dem konventionellen Vergleichsfahrzeug umrechnen. Dies haben wir für verschiedene Fahrzeugklassen durchgerechnet, die überwiegend innerstädtisch genutzt werden, sich aber in ihrer Größe und Masse unterscheiden (Abb. 3). Dieses Diagramm erlaubt einige bemerkenswerte Schlussfolgerungen:

■ Bei Stadtfahrten wird der Vorteil des Elektrofahrzeugs umso größer, je höher die Fahrzeugmasse ist. Ursache: Mit zunehmender Fahrzeugmasse steigt der Kraftstoffverbrauch wesentlich stärker als der Stromverbrauch des vergleichbaren Elektrofahrzeugs, das bis zu 90 Prozent der kinetischen Energie beim Bremsen rekuperieren kann.

■ Im selben Verhältnis gewinnt das Elektrofahrzeug gegenüber dem konventionellen Fahrzeug an Wirtschaftlichkeit.

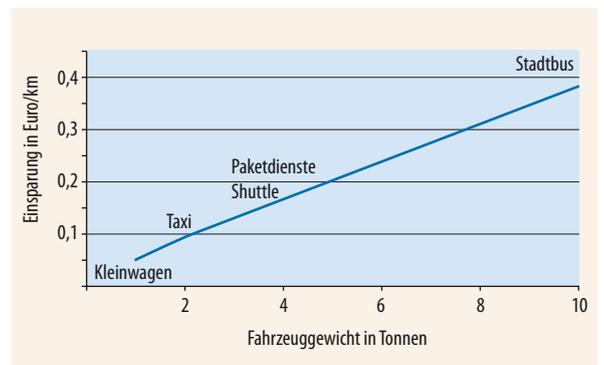


Abb. 3 Aus dem Energieverbrauch gemäß Abb. 2 berechnete Einsparung durch den elektrischen Antrieb für verschiedene Fahrzeugklassen und damit Fahrzeugmassen. Angenommen sind ein Dieselpreis von 1,45 Euro/l und ein Strompreis von 0,2 Euro/kWh.

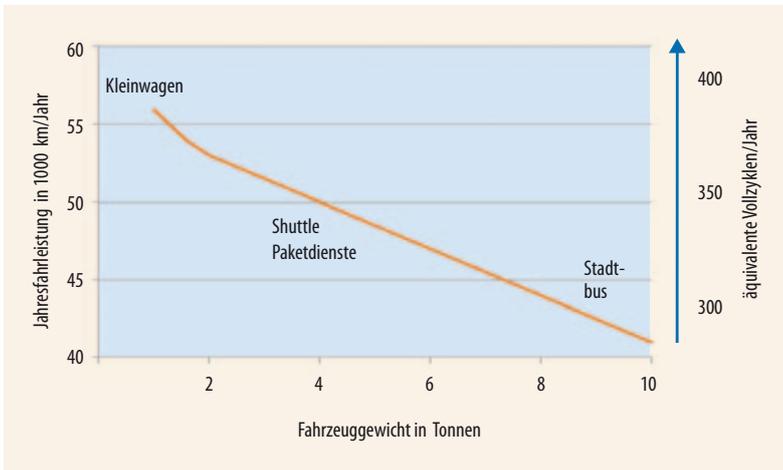


Abb. 4 Von der Fahrzeugklasse hängt es ab, wie viele „Vollzyklen“ eine Batterie mit 150 km Reichweite jährlich für das Erreichen der Wirtschaftlichkeit leisten müsste, wenn sie über fünf Jahre abgeschrieben wird, bei einem Aufpreis für die Batterie von 1000 Euro/kWh. Für alle Fahrzeugklassen lassen sich die aus dieser Randbedingung abgeleiteten Vollzyklenanforderungen von hochwertigen Fahrzeugbatterien heute erreichen.

Der ökologische Vorteil des Elektrofahrzeugs wächst linear mit der Wirtschaftlichkeit, da diese allein auf der Menge der im konventionellen Fahrzeug verbrannten fossilen Brennstoffe basiert. Ökonomie und Ökologie sind direkt positiv korreliert.

Wir legen Wert auf die Feststellung, dass diese Ergebnisse für innerstädtische Fahrten gelten. Mit zunehmenden Überland- oder Autobahnfahrten verlieren Elektrofahrzeuge ihre ökonomischen Vorteile, während der ökologische Nutzen beim Fahrzeugbetrieb mit Strom aus erneuerbaren Quellen erhalten bleibt. Ausgehend von den Kostenvorteilen (Abb. 3) lässt sich die durchschnittliche jährliche Fahrleistung darstellen, die nötig ist, um mit dem Elektrofahrzeug genauso wirtschaftlich zu fahren wie mit dem vergleichbaren konventionellen Fahrzeug (Abb. 4). Bei aktuellen Batteriepreisen von rund 1000 Euro pro kWh sind private Elektrofahrzeuge offenbar nicht wirtschaftlich zu betreiben. Dagegen ergeben sich bei hohen jährlichen innerstädtischen Fahrleistungen interessante wirtschaftliche Perspektiven. Dies gilt für Taxis, Liefer- und Zustelldienste und besonders für Stadtbusse.

Wirtschaftliche Zyklen

Damit sich Batterien im gewerblichen Verkehr etablieren können, müssen sie – abhängig von der Branche – über die Lebensdauer des Fahrzeugs ausreichend viele Lade- und Entladevorgänge mitmachen (Abb. 4). Eine Batterie unterliegt als elektrochemisches System vielfältigen Degradationsprozessen. Einige sind rein zeitabhängig und bestimmen die Lebensdauer der Batterie. Dies gilt z. B. für die Diffusion von Wassermolekülen

Notwendige Zyklenlebensdauern		
Fahrzeugklasse	Lebensdauer-Fahrleistung in km	äquivalente Vollzyklen
PKW	182 500	1217
Nutzfahrzeuge bis 3,5 t	350 000	2333
Stadtbus	700 000	4667

Tab. Für verschiedene Fahrzeugklassen unterscheiden sich die notwendigen Zyklenlebensdauern. Angenommen wird dabei eine Batteriereichweite von 150 km.

durch Dichtungen und Folienschweißnähte der elektrochemischen Zelle. Auch das Laden bzw. Entladen der Batterie löst Degradation aus und führt dazu, dass Lithium-Ionen irreversibel immobilisiert werden oder Teile der Anode keine Lithium-Ionen mehr einlagern können. Dadurch nimmt die Kapazität der elektrochemischen Zelle mit der Zeit und mit der Zahl der Lade- und Entladezyklen ab.

Die dimensionslose „Zyklenlebensdauer“ gibt die Zahl der Lade- und Entladezyklen an, nach der die Kapazität der Zelle auf 80 % der Nennkapazität gesunken ist. Physikalisch besagt das gleichzeitig, wie viel elektrische Energie durch die Zelle hindurchgeflossen ist. Hochwertige Lithium-Ionen-Zellen für Automobile schaffen heutzutage mehrere tausend Zyklen. Bei einer typischen Nennkapazität von 40 Ah und einer mittleren Spannung von 3,6 Volt kann eine einzelne Zelle im Laufe ihres technischen Lebens also durchaus 0,5 bis 1 MWh umsetzen. In einer typischen Lithium-Ionen-Batterie sind rund 150 Einzelzellen verschaltet.

In langjähriger Entwicklungsarbeit ist es gelungen, die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Zellen an die typische Lebensdauer eines Kraftfahrzeugs von zehn Jahren anzupassen. Die Anforderungen an die Zyklenlebensdauer sind jedoch sehr unterschiedlich: So reicht für die private Nutzung eines Elektrofahrzeugs ein Ladevorgang alle drei Tage aus, um die durchschnittliche tägliche Fahrleistung abzudecken. Das entspricht über zehn Jahre etwa 1200 Zyklen. Bei Taxis, Lieferwagen oder Stadtbusen reicht das nicht aus (Tabelle). Hier kommt erschwerend hinzu, dass sich diese Fahrzeuge nicht mehr batterieschonend über viele Stunden aufladen lassen, sondern unter Umständen mehrfach während eines Tages innerhalb von 5 bis 15 Minuten ausreichend Reichweite nachladen müssen. Insbesondere für Stadtbusse stehen aktuell keine Lithium-Ionen-Zellen zur Verfügung, die diesen Anforderungen über die erforderliche Nutzungsdauer genügen, sodass ein Batterietausch notwendig ist. Interessanterweise ist der Stadtbus selbst unter diesen Bedingungen immer noch wirtschaftlich, denn die Einsparung von Dieselmotorkraftstoff überkompensiert die doppelten Batteriekosten zuzüglich des Ladestroms.

Zwischenspeicher für schwankenden Bedarf

Mit zunehmender Substitution thermischer Kraftwerke durch Windenergie- und Photovoltaikanlagen wird es sehr viel schwieriger, die Energieerzeugung an den Verbrauch bzw. „Lastgang“ anzupassen.³⁾ Anlagen zur Erzeugung regenerativer Energien darf der Netzbetreiber zwar im Falle eines Überangebotes (zu hohen Kosten) abregeln, bei ausbleibendem Wind und Sonnenschein steht aber keine Quelle zur Verfügung, um den Energiebedarf zu decken. Hier können einerseits große Energiespeicher helfen, gerade nicht benötigten regenerativen Strom zwischenspeichern. Beim Verbrauch können andererseits kleine dezentrale Speicher den Energiebedarf von Privathaushalten oder kleinen Gewerbebetrieben in einer Mangelsituation speisen, bevor Energie aus dem Netz angefordert wird. Überraschenderweise ergeben sich selbst zu den heutigen Preisen für große stationäre Lithium-Ionen-Batterien, die bei rund 700 bis 1000 Euro pro kWh liegen, kurz- bis mittelfristig für beide Anwendungen wirtschaftliche Perspektiven.

Die Erzeugung von Solarstrom hat sich mittlerweile etabliert. Aufgrund der gesunkenen Modulpreise lässt sich je nach Region Strom zu 10 bis 20 Cent pro Kilowattstunde erzeugen. Es ist damit zu rechnen, dass einerseits die Preise für Solarmodule noch weiter fallen, andererseits die Strombezugskosten aus dem Netz (englisch: grid) weiter steigen werden [3]. „Grid parity“ ist erreicht, wenn die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen genauso viel kostet wie der Strombezug aus dem konventionell versorgten Netz. Da der Lastgang im Stromverteilnetz in der Regel nicht der Erzeugungscharakteristik der Photovoltaikanlage entspricht, ist es schwer, diesen Zustand zu erreichen. Um diese Anpassung zu verbessern, können Batterien überschüssige Energie zwischenspeichern, um sie etwa in den sonnenarmen Morgen- und Abendstunden bereit zu stellen. Ein solcher Speicher kann wirtschaftlich arbei-

ten, wenn Solarstrom inkl. Speicherung günstiger ist als Strom aus dem konventionellen Netz („battery parity“).

„Battery parity“ könnte zuerst auf mittelgroßen Inseln in sonnenreichen Regionen Europas zu erreichen sein. Viele davon sind nicht an das Festlandsnetz angeschlossen und erzeugen daher ihren Strom mit Dieselgeneratoren, mit Kosten von etwa 50 Cent/kWh. Ein stationärer Batteriespeicher ist also wirtschaftlich, wenn er den mit 10 Cent/kWh erzeugten Photovoltaikstrom für höchstens 40 Cent/kWh zwischenspeichern kann. Daraus ergeben sich interessante technische Randbedingungen: Während die Anforderungen für Automobile (hohe Energie- und Leistungsdichte, sicherheitstechnische Anforderungen etc.) nur sehr schwer zu erfüllen sind, spielen diese Aspekte bei der stationären Speicherung eine untergeordnete Rolle. Der stationäre Speicher muss keinen Crashtest bestehen und lässt sich besser gegen extreme Temperaturschwankungen abschirmen als eine Fahrzeugbatterie. Allerdings muss er als Bestandteil einer stationären Energieerzeugungsanlage ein bis zwei Lade- und Entladezyklen pro Tag leisten, und seine Lebensdauer muss vergleichbar sein mit den rund 20 Jahren einer Photovoltaikanlage. Daher muss die Batterie über ihre Lebensdauer bis zu 14 600 Lade- und Entladezyklen überleben, was derzeit keine kommerzielle Lithium-Ionen-Batterie erfüllt. Wohl aber gibt es Batterien, welche die Hälfte dieser Werte erreichen. Mit dem angenommenen Batteriepreis von 1000 Euro/kWh ergeben sich Kosten von 13,7 Cent für das einmalige Ein- und Ausspeichern von 1 kWh Photovoltaikstrom.⁴⁾ Unter Berücksichtigung der Kosten für die notwendige Leistungselektronik für die Netzanbindung der Batterie sowie die Lade- und Entladeelektronik betragen die Speicherkosten 25 Cent für eine Kilowattstunde. Mit den Stromerzeugungskosten aus der Photovoltaikanlage liegen die Gesamtkosten bei 35 Cent/kWh. Damit ist diese Kombination unter den angenommenen Randbedingungen bereits heute wirtschaftlich attraktiv.

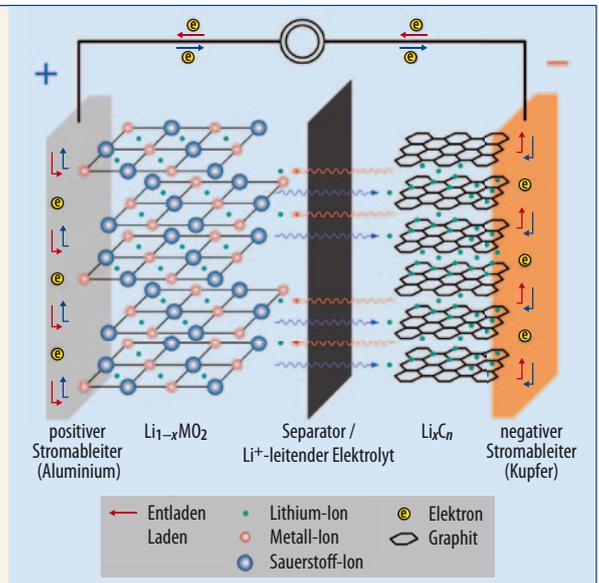
3) Dieser Lastgang war und ist recht gut vorher-sagbar und in Daten-banken wie z. B. des „European Network of Transmission System Operators for Electricity“ (www.entsoe.eu) abrufbar.

4) Die Berechnung erfolgt dabei ohne Verzinsung des eingesetzten Kapitals.

LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Eine Lithium-Ionen-Batterie besteht aus einer oder mehreren elektrochemischen Lithium-Ionen-Zellen, die seriell oder parallel miteinander verschaltet sind (Abb.). Jede dieser Zellen besteht aus einer Kathode (+) und einer Anode (-), die ein Separator elektrisch und mechanisch voneinander trennt. Sowohl die Kathode als auch die Anode sind in der Lage, Lithium-Ionen aufzunehmen und deren Ladungs-zustand um $\pm e$ zu ändern.

Die gesamte Anordnung ist von einem (meist flüssigen) Elektrolyten durchdrungen, der den Austausch der Lithium-Ionen zwischen Kathode und Anode durch den porösen Separator hindurch erlaubt. In diesem Beispiel bestehen beide Elektroden aus Materialien, die Lithium-Ionen zwischen Netzebenen einlagern können (sog. Interkalationsmaterialien). Für die Anode wird häufig Graphit verwendet, während die Kathode aus einem Lithium-Metalloxid besteht, wobei als Metall üblicherweise Nickel, Kobalt oder Mangan oder Mischungen dieser drei Elemente dienen. Die ebenfalls häufig anzutreffende Lithium-Eisenphosphat-Zelle funktioniert nach einem ähnlichen Prinzip.



KIT, Institut für thermische Verfahrenstechnik

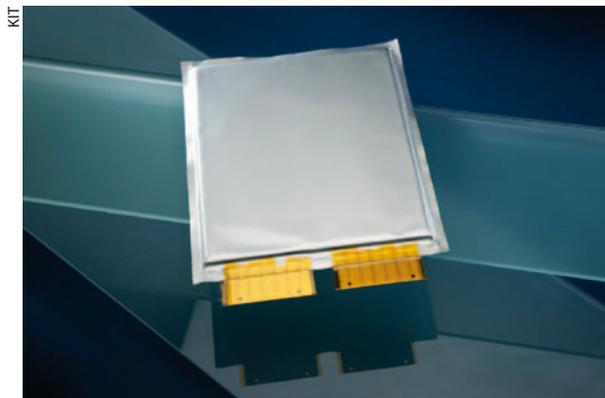


Abb. 5 Die meisten kommerziellen Hochenergie-Lithium-Ionen-Zellen für batterieelektrische Fahrzeuge sind in eine spezielle Verpackungsfolie eingeschweißt, haben eine Grundfläche von etwa DIN A5 und einem Energieinhalt von ca. 150 Wh.

Für Deutschland ist diese spezielle Anwendung aufgrund der niedrigeren Sonneneinstrahlung im Winter und des vergleichsweise günstigen Festnetz-Strompreises auf absehbare Zeit keine wirtschaftliche Option für die Neuerrichtung einer Stromerzeugungsanlage. Hierzulande ist die Kostenrechnung deutlich komplizierter wegen der im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) vorgesehenen Vergütungen für die Netzeinspeisung von regenerativ erzeugtem Strom, die einer zeitlichen Degression unterliegen. Um die Netzbelastung zu reduzieren, wurden weiterhin Vergütungen für den Eigenverbrauch dieses Stroms beschlossen. Mit dem im Juni 2012 abgeschlossenen parlamentarischen Verfahren zur EEG-Novelle⁵⁾ änderten sich die Berechnungsvorschriften für Einspeisevergütung und Eigenverbrauch nochmals. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in diesem volatilen Rechtsrahmen erfordern eine Vielzahl von Annahmen und erreichen rasch den Komplexitätsgrad einer Diplomarbeit. Unsere bisherigen Berechnungen haben für Deutschland mit realistischen Annahmen für die Preisentwicklung von Strombezug, Batterie und Leistungselektronik für die nächsten zwei bis drei Jahre keine Evidenz für einen wirtschaftlichen Betrieb von stationären Speicherbatterien im Privathaushalt ergeben. Mit weiter steigenden Strompreisen oder einer Förderung der Speicherung kann sich diese Situation aber auch rasch ändern.

Günstigere Batterien mit höherer Energiedichte

Weltweit arbeiten in Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrielabors viele Arbeitsgruppen an neuen Aktivmaterialien mit höherer Energiedichte, höherer Leistungsdichte und/oder den entsprechend verbesserten massenbezogenen Größen. Als besonders aussichtsreiche Kandidaten gelten die elektrochemischen Paare Lithium/Schwefel und Lithium/Sauerstoff (Infokasten, Abb. 5). Dies liegt an den theoretischen Energiedichten solcher Zellen, die um ein bis zwei Größenordnungen über denen der besten heute kommerziell verfügbaren Systeme liegen, in denen Wirtsmaterialien für die Lithium-Ionen erhebliche

Gewichts- und Volumenanteile beanspruchen, ohne selbst zur Energiespeicherung beizutragen. Wie das Beispiel der Lithium-Ionen-Batterie zeigt, benötigt die Entwicklung eines neuen elektrochemischen Systems wegen der außerordentlichen Komplexität nicht selten 20 Jahre. Deshalb ist nicht zu erwarten, dass in dieser Dekade Batterien zur Verfügung stehen werden, die z. B. Elektroautos eine Reichweite vergleichbar mit heutigen Fahrzeugen verleihen. Den benötigten Zeitraum für eine Verdoppelung der spezifischen Energie haben wir in einer Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie mit etwa sieben Jahren angegeben, wobei diese Entwicklung ein hohes technologisches Risiko enthält [4]. Parallel zur Materialentwicklung arbeiten alle Zellenhersteller selbstverständlich daran, die Produktionskosten kontinuierlich zu senken. Hier ist – unter Beibehaltung der heute eingesetzten Produktionsverfahren – eine industrieübliche Degressionskurve zu erwarten, die in den nächsten Jahren nicht dazu führen wird, dass Elektrofahrzeuge für den privaten Gebrauch wirtschaftlich werden [4]. In der genannten Studie für das BMWi kamen wir zu dem Ergebnis, dass es einiger Innovationen im Produktionsverfahren bedarf, um innerhalb eines Planungshorizonts von sieben Jahren die Batterie-Herstellungskosten auf etwa 250 Euro pro kWh zu senken. Damit wären batterieelektrische Privatfahrzeuge wirtschaftlich. Da die Batterieentwicklung einige Jahre vor der Markteinführung des damit ausgerüsteten Fahrzeugs abgeschlossen sein muss, können wir mit solchen Fahrzeugen aber wohl nicht vor 2020 rechnen.

Literatur

- [1] DPG (Hrsg.), Klimaschutz und Energieversorgung in Deutschland 1990 – 2020, Bad Honnef (2005)
- [2] DPG (Hrsg.), Elektrizität: Schlüssel zu einem nachhaltigen und klimaverträglichen Energiesystem, Bad Honnef (2010)
- [3] W. Fichtner et al., Die Weiterentwicklung der Energiewirtschaft in Baden-Württemberg bis 2025 unter Berücksichtigung der Liefer- und Preissicherheit, KIT, Karlsruhe (2012)
- [4] A. Gutsch, Competence E: Integrierte Entwicklung für zukünftige elektrische Energiespeicher und elektrische Antriebssysteme: Ergebnisbericht zur Machbarkeitsstudie der Projektphase I, Eggenstein-Leopoldshafen (2011) (Förderkennzeichen BMWi 03ET2029)

DIE AUTOREN

Olaf Wollersheim studierte Physik in Bonn und promovierte dort 1995 im Bereich der angewandten Mikrostrukturforschung. Am Forschungszentrum Karlsruhe war er zunächst als Postdoc in der Mikrosystemtechnik, dann als Vorstandsreferent im Bereich von Herbert Gleiter tätig, wo er die Nanotechnologie als neue Forschungsrichtung mit etablierte. Nach einigen Jahren als Geschäftsführer des Instituts für Marktökologie in Weinfelden (Schweiz) kehrte er nach Karlsruhe ans KIT zurück, um mit Andreas Gutsch das Projekt „Competence E“ zu koordinieren.



Andreas Gutsch studierte Chemie-Ingenieurwesen an der Universität Karlsruhe, wo er auch promovierte. Anschließend begann er seine berufliche Laufbahn bei der Degussa AG in der Verfahrens- und Prozessentwicklung. Nach der Leitung des Projekthauses Nanomaterialien übernahm er innerhalb der Evonik AG die Führung der Creavis. Von 2006 bis 2010 war Gutsch alleiniger Geschäftsführer der Li-Tec Battery GmbH. Im Rahmen ehrenamtlicher Tätigkeiten ist er in Gremien des BMBF und der DFG vertreten.



5) Der Text des „Gesetzes zur Änderung des Rechtsrahmens für Strom aus solarer Strahlungsenergie und weiteren Änderungen im Recht der erneuerbaren Energien“ findet sich auf www.erneuerbare-energien.de/erneuerbare-energien/pv-novelle_2012/doc/print/48542.php