



Batterietechnologien für elektrisch angetriebene Fahrzeuge

von Sebastian Martin

Lithium-Ionen-Akkumulatoren, Grundprinzipien, aktueller Entwicklungsstand und Ausblick auf potenziell disruptive Technologien

Elektroantriebe arbeiten vibrations- und geräuscharm und stoßen am Ort ihrer Nutzung keine Schadstoffe aus. Sie sind im Vergleich zu Verbrennungsmotoren leichter und kompakter. Bei einem Vergleich der Wirkungsgrade von aktuellen PKW-Verbrennermotoren hebt sich die Technologie des VTG-Laders beim direkt einspritzenden Turbodiesel-Motor ab. Diese Verbrennungsmotoren-Technologie erreicht im optimalen Drehzahlbereich einen Wirkungsgrad von über 40%.¹ Der Wirkungsgrad von Elektromotoren liegt bei etwa 90%.² Neben dem im Vergleich etwa doppelten Wirkungsgrad verfügen Elektromotoren über eine sehr hohe Lebensdauer mit wenig oder keinem Wartungsbedarf.³

Unter der Bedingung, dass sie mit regenerativ gewonnenem Strom angetrieben werden, ist der Betrieb von Fahrzeugen mit Elektromotor

zudem deutlich ressourcenschonender und klimafreundlicher.⁴

Es ist also keinesfalls die Motorentechnik, die eine Verbreitung von Elektrofahrzeugen hemmt. Die größte Herausforderung besteht im hohen Entwicklungsbedarf von Speichern für elektrische Energie. Die Herstellung elektrochemischer Energiespeicher ist im Unterschied zum simplen Hohlraum eines Benzintanks bei Verbrennungsmotoren, welcher petrochemisch gebundene Energie in Form von flüssigem Kraftstoff speichert, ungleich aufwendiger.

Um erfolgreich Einzug in den Massenmarkt zu halten, müssen sich die elektrochemischen Energiespeicher mit den großen Reichweiten von Verbrennungsfahrzeugen messen. Welchen Weg die Elektromobilität nimmt, wird sich dementsprechend maßgeblich anhand

der Entwicklung bei den Speichertechnologien entscheiden. Doch wie ist der derzeitige Stand der Technik bei Batterien? Welche Technologien und Konzepte sind am vielversprechendsten?

Grundprinzipien und Bauformen von Batterien

Um diese Frage zu beantworten, ist es sinnvoll, sich zunächst einmal den Grundprinzipien der verschiedenen Bauformen von Batterien mit ihren Vor- und Nachteilen zu widmen. Erst dann sollte die Zellchemie der verschiedenen Batterietypen und deren Potenziale gegeneinander abgewogen werden.

Aufgrund der aktuellen Bedeutung für die Elektromobilität werden bei der folgenden Betrachtung die drei Bauformen kommerzieller Lithium-Ionen-Zellen unterschieden: zylindrische, prismatische und sogenannte Pouch-Zellen,

1 Schiepp Thomas, Straub Markus, Manz Carsten, (2011), "Automobilantrieb im Wandel, Zunehmende elektrifizierung und Hybridisierung des Automobilantriebs, Konstanzer Managementschriften, Carsten", S. 31
2 Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, (2015), "Wirkungsgrad-Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Fahrzeugen mit Elektromotor", S. 5
3 Paschotta Rüdiger, (2020), Elektromotor, Abgerufen 24.04.2020, von <https://www.energie-lexikon.info/elektromotor.html>
4 Wietschel Martin, Kühnbaach Matthias, Rüdiger David, (2019), "Fraunhofer ISI, Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland" S. 36

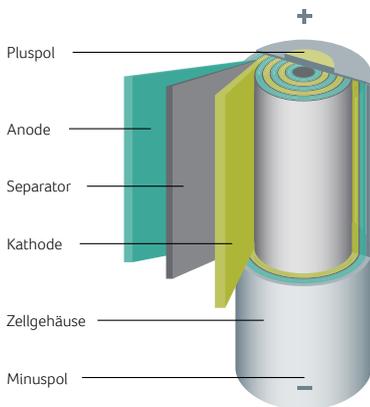


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer zylindrischen Zelle.
Quelle: atene KOM GmbH

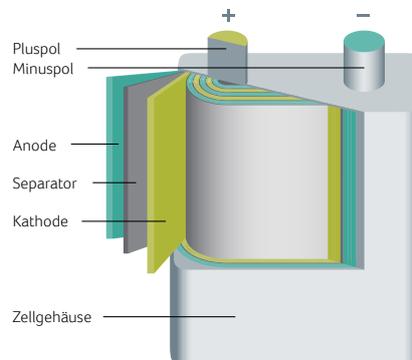


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer prismatischen Zelle.
Quelle: atene KOM GmbH

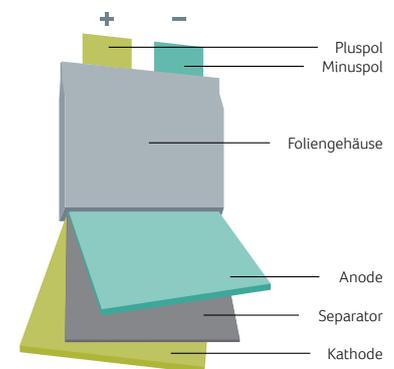


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Pouch-Zelle.
Quelle: atene KOM GmbH

auch Pouchbag- oder Coffeebag-Zellen genannt.⁵ Bei prismatischen Zellen wird außerdem zwischen gewickelten und gestapelten Elektrodenpaaren unterschieden.⁶

In einer zylindrischen Zelle ist der Elektrodenstapel aufgerollt und in einem metallischen Gehäuse untergebracht. Diese Zellen sind die etablierteste Bauform von Batteriezellen. Sie kommen schon seit den Anfängen der Batterietechnologie bei einer Vielzahl von Anwendungen zum Einsatz. Zylindrische Zellen sind günstig in der Herstellung, das stabile Gehäuse bietet Schutz vor mechanischen Einflüssen und toleriert einen gewissen Gasdruck im Inneren der Zelle. Wegen ihrer zylindrischen Form lassen sich die Zellen jedoch nicht ohne Raumverlust zu Modulen und Packs kombinieren.

Prismatische Zellen haben dagegen eine flache, rechteckige Form und lassen sich platzsparend stapeln. Sie werden durch ein mechanisch beständiges Plastik- oder Metallgehäuse geschützt. Sowohl bei prismatischen als auch bei den weiter unten beschriebenen Pouch-

Zellen gibt es zwei unterschiedliche Arten der Elektrodenanordnung: Entweder erfolgt die Elektrodenanordnung über einen ovalen Wickel um einen flachen Kern oder durch alternierende Stapelung von Elektroden und Separatoren. Die ovale Wicklung ist bei großen Zellen von Vorteil, weil sie kostengünstiger und deutlich schneller gefertigt werden kann. Die Stapelung einzelner Elektroden und Separatoren kostet zwar mehr Zeit, ermöglicht aber eine bessere Raumnutzung innerhalb der Zelle und ist speziell bei sehr flachen Zellen mechanisch von Vorteil.⁷

Bei einer Pouch-Zelle bildet eine dünne, flexible Aluminium-Verbundfolie das Gehäuse.⁸ Pouch-Zellen besitzen die höchste Energie- und Leistungsdichte, da Hülle und Stromkollektoren nur geringe Gewichtsanteile verursachen.⁹

Entwicklungspotenziale von Batterietechnologien

Im Hinblick auf Batterietechnologien für den Einsatz in Elektrofahrzeugen weisen großformatige Lithium-Ionen-Batterien (LIB) für die kommenden zehn bis 20 Jahre ein hohes

evolutionäres Entwicklungspotenzial, sowohl bezüglich der Energiedichten als auch einer Reduktion der Kosten auf.¹⁰

Aus diesem Grund gelten LIB als Plattformtechnologie für eine globale Anwendung in elektronisch betriebenen Pkw. Sie sind aus heutiger Sicht die aussichtsreichste Speichertechnologie. Erst danach könnten alternative Batterietechnologien wie die Lithium-Schwefel- oder Lithium-Feststoff-Batterie in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen. Hierfür müssten sie jedoch den deutlich höheren Anforderungen an Kosten, Energiedichte und Serienproduktionsreife gerecht werden, welche die bis zu diesem Zeitpunkt deutlich optimierten LIB erfüllen werden.

Die Entwicklung im Bereich kleinformatiger LIB-Technologie für Unterhaltungselektronik lässt die Prognose zu, dass bis etwa 2030 mit einer Verdopplung der Energiedichte (bis zu 300 Wh/kg) und einer Kostenreduktion auf unter 100 €/kWh bei LIB-Zellen zu rechnen ist.¹¹

5 BINE Informationsdienst, (2017) "Elektromobilität, Was uns jetzt und künftig antreibt: Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybridantrieb", S. 8

6 Hopp Hannes. (2016). "Thermomanagement von Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle. Wiesbaden: Springer", S. 12

7 BINE Informationsdienst, (2017) "Elektromobilität, Was uns jetzt und künftig antreibt: Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybridantrieb", S. 8

8 Ebd.

9 Hopp Hannes. (2016). "Thermomanagement von Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle. Wiesbaden: Springer", S. 6

10 Dr. Thielmann, Axel, Sauer, Andreas, Prof. Dr. Wietschel Martin, (2015), "Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030", S. 28

11 Ebd., S. 3

Laut einer Analyse von "Bloomberg New Energy Finance" liegt der Durchschnittspreis eines Lithium-Ionen-Akkus für E-Fahrzeuge aktuell bei etwa 209 Dollar pro Kilowattstunde.¹² 2010 hingegen lagen die Batteriekosten noch bei rund 600 Euro pro Kilowattstunde (kWh).¹³

Das Unterschreiten der Grenze von 100 Dollar pro Kilowattstunde (Preis auf Batterie-Pack-Ebene) wird für 2025 erwartet.¹⁴

Vor- und Nachteile künftiger Batterietechnologien

Vor dem Hintergrund dieser positiven Entwicklung der vergangenen Jahre und angesichts ihres Zukunftspotenzials werden LIB auf absehbare Zeit die dominierende Batterietechnologie bleiben. Gleichzeitig werden alternative Zukunftstechnologien entwickelt, deren potenziell erreichbare Energiedichten noch einmal deutlich höher liegen: Ab 400 Wh/kg (Zellebene) ergeben sich völlig neue Möglichkeiten für Anwendungen, Design, Geschäftsmodelle und letztlich auch in puncto Reichweite von E-Fahrzeugen. Heute kommen Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) für hybridelektische Fahrzeuge (HEV) und großformatige LIB-Batterien für Plug-In-Hybride (PHEV) und rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) zum Einsatz. Für die Hochenergie-Lithium-Ionen-Batterie (HE-LIB) zeichnet sich für den Zeitraum bis 2030 ab, dass von den vielen Zellchemievarianten – Lithium-Eisenphosphat (LFP), Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA)-Kathode und Graphit-Anode – NMC-basierte Zellen die vielversprechendste Wahl für eine weitere Optimierung der Energiedichte sind.

Aktuelle Entwicklungen befassen sich auch mit lithiumreichen und kobaltreduzierten

Zellchemie	Pro	Contra
Lithium-Eisenphosphat (LFP)	Höhere Leistungsdichte, längere Lebensdauer, bessere Sicherheitsparameter	Batteriezellen mit LFP-Kathode und Graphit-Anode haben eine geringere Energiedichte
Nickel-Kobaltaluminium (NCA)	relativ hohe Lebensdauer, hohe spezifische Leistung, hohe spezifische Energie	hohe Herstellungskosten und höhere Brandgefahr
Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC)	niedrige Selbsterhitzung, je nach Zusammensetzung der Mischoxide entweder für hohe Leistung oder hohe Kapazität optimierbar	empfindlich gegen extreme Temperaturschwankungen und Überladen
Lithium-Manganoxid (LMO)	geringere Kosten, höhere Sicherheit	geringere Lebensdauer

Tabelle 1: Vergleich alternativer Batterietechnologien mit aktuellen Lithium-Ionen-Batterien

Hochenergiesystemen, die Anoden aus Silizium-Kohlenstoff-Kompositen (Si/C) verwenden.¹⁵

Da mit einem zunehmenden globalen Bedarf an Batterien die Preise für den Rohstoff Kobalt noch weiter steigen werden und dieser Rohstoff darüber hinaus in Konfliktgebieten abgebaut wird, verfolgen immer mehr Hersteller das Ziel, den Kobalt-Anteil in ihren Batterien zu reduzieren. Aktuelle Entwicklungen von Tesla und Panasonic zielen sogar darauf ab, in künftigen Batteriegenerationen vollständig auf Kobalt zu verzichten.¹⁶

Alternative Technologien über 2030 hinaus

Perspektivisch marktreife Produkte für den Zeitraum ab 2030 sind Feststoffbatterien sowie Magnesium-Luft- und Lithium-Luft-Batterien, deren Energiedichte deutlich über dem Leistungspotenzial aktueller LIB liegen wird.

Für künftige Elektrofahrzeugbatterien eignen sich Feststoffbatterien am besten. Sie werden sich aufgrund der Leistungsparameter gegenüber der aktuell noch

dominanten Lithium-Ionen-Batterie-Technologie durchsetzen.

Lithium-Feststoff-Batterien besitzen, im Unterschied zu den bisher verwendeten gelartigen, feste Elektrolytmaterialien, die unter anderem eine hohe Hitzebeständigkeit aufweisen und eine schnelle Energieaufnahme ermöglichen. Die Lithium-Feststoff-Batterie macht aufwendige Kühlmechanismen überflüssig und reduziert hierdurch verglichen mit den LIB den Platzbedarf im Fahrzeug. Darüber hinaus gilt die Lithium-Feststoff-Batterie als deutlich sicherer, da es bei Unfällen nicht zu den gefürchteten Metallbränden kommen kann.¹⁷

Firmen wie BMW, Nissan oder Honda entwickeln derzeit entweder selbst Lithium-Feststoff-Akkus oder haben Partnerschaften mit spezialisierten Unternehmen geschlossen. Sowohl Toyota als auch Dyson haben darüber hinaus angekündigt, bereits in den kommenden Jahren

¹² Chediak Mark, (2017).

Abgerufen 24.04.2020, von <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-12-05/latest-bull-case-for-electric-cars-the-cheapest-batteries-ever>

¹³ Industrie.de, (27.06.2018), Trotz fallender Batteriekosten bleiben Elektromobile teuer.

Abgerufen 24.04.2020, von <https://industrie.de/top/trotz-fallender-batteriekosten-bleiben-elektromobile-teuer/>

¹⁴ Bönnighausen Daniel (6.12.2017), Akku-Preise im Schnitt bei 209 Dollar pro kWh.

Abgerufen 24.04.2020 von <https://www.electrive.net/2017/12/06/akku-preise-im-schnitt-bei-209-usd-pro-kwh/>

¹⁵ Dr. Thielmann Axel, Andreas Sauer, Prof. Dr. Wietschel Martin, (2015), "Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI", S. 3

¹⁶ Rubel Bernd, (14.06.2018). (Nicht nur) Tesla arbeitet an Elektroauto-Akkus ohne Kobalt.

Abgerufen 24.04.2020, von <https://www.mobilegeeks.de/news/tesla-panasonic-elektroauto-akkus-ohne-kobalt/> am 19.06.2019.

¹⁷ Dr. Thielmann Axel, Dr. Fan Cheng, Dr. Friedrichsen Nele, Gnann Till, Hettesheimer Tim, Hummen Torsten, Dr. Marscheider-Weidemann Frank, Dr. Reiß Thomas, Sauer Andreas, Prof. Dr. Wietsche Martin, (2014). "Energiespeicher für die Elektromobilität Deutschland auf dem Weg zum Leitmarkt und Leitanbieter?" S. 32.

erste Feststoffakkus für Autos auf den Markt bringen zu wollen.¹⁸

Noch im Stadium der Grundlagenforschung befinden sich dagegen die oben erwähnten Magnesium-Luft-Batterien, bei denen Elektrizität durch eine Reaktion des Sauerstoffes aus der Umgebungsluft mit Magnesium generiert wird. Hier erfolgt eine kathodenseitige Reduktion von Sauerstoff sowie eine Oxidation von Magnesium an der Anode. Theoretisch besitzt diese Batterietechnologie eine deutlich höhere Energiedichte als Lithium-Ionen-Batterien. Es ist allerdings noch nicht belegt, ob Magnesium-Luft-Zellen als elektrisch wiederaufladbare Batterien realisierbar sind.¹⁹

Ähnlich sieht es bei Lithium-Luft-Akkumulatoren aus: Dort wird die Kathode der Batterie durch Luft ersetzt, die Anode besteht aus Lithium. Weil der für die Reaktion benötigte Sauerstoff aus der Umgebungsluft

entnommen werden kann, entscheidet bei dieser Technologie allein die Größe der Anode über die Kapazität der Batterie-Zelle. Demzufolge liegt zumindest die theoretisch erreichbare Energiedichte dieser Technologie über der aller anderen Batterietechnologien. Aktuelle Forschungsprojekte befassen sich aber auch bei Lithium-Luft-Batterien damit, ob und wie sie als wiederaufladbare Systeme für Elektrofahrzeuge verwendbar sind.

Ausblick

Forschungen und Entwicklungen an künftigen Batterietechnologien der Post-Lithium-Ionen-Generation, wie etwa Lithium-Schwefel-, Metall-Luft-Batterien etc. könnte zu wegweisenden Durchbrüchen führen. Feststoffbatterien haben das Potenzial, sich aufgrund der positiven Leistungsparameter gegenüber Lithium-Ionen-Batterien durchzusetzen. Aktuelle Forschungsergebnisse zu Lithium-Schwefel-Batterien belegen eine geringe volumetrische

Energiedichte. Wie bei Lithium-Luft-Batterien befürchtet man jedoch gegenwärtig eine zu geringe Zyklenstabilität. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich diese Technologien noch am Anfang der Entwicklung befinden.²⁰

Aufgrund ihrer hohen theoretischen spezifischen Energie von 2,6 kWh/kg gelten die Lithium-Schwefel-Batterien weiterhin als vielversprechende Kandidaten für zukünftige wiederaufladbare Energiespeichersysteme. Die Energiedichte dieser Technologie liegt mehr als fünfmal so hoch wie die von heutigen Lithium-Ionen-Batterien. Ein großer Vorteil ist zudem, dass Schwefel kostengünstig, umweltfreundlich und in großen Mengen verfügbar ist. Bedenken, die Rohstoffe für die Elektromobilität – wie zum Beispiel Kobalt – aus Krisengebieten importieren zu müssen, sind beim Schwefel jedenfalls unbegründet.²¹ ■

18 Dr. Thielmann Axel, Andreas Sauer, Prof. Dr. Wietschel Martin, (2015), "Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI", S. 32

19 Kessler Markus, (14.02.2018). Feststoffakkus versprechen doppelte Kapazität für E-Autos. Abgerufen 24.04.2020, von <https://futurezone.at/science/feststoffakkus-versprechen-doppelte-kapazitaet-fuer-e-autos/400003715>

20 Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V. (o. J.), Funktionale Hybrid-Separatoren für Lithium-Schwefel Batterien. Abgerufen 24.04.2020 von <https://www.ifw-dresden.de/de/institute/institut-fuer-komplexe-materialien/abteilungen/elektrochemische-energiespeicher/forschung/funktionale-hybrid-separatoren-fuer-lithium-schwefel-batterien/>

21 Ebd.



Über den Autor

Sebastian Martin hat Kunststoff- und Elastomertechnik an den Hochschulen für angewandte Wissenschaften Rosenheim und Würzburg studiert. Die Schwerpunkte seiner Arbeit liegen in den Themenbereichen Digitalisierung, nachhaltige Technologien und Energieeffizienz.

s.martin@atenekom.eu

Über die atene KOM

Die atene KOM GmbH aus Berlin begleitet den öffentlichen Sektor bei der Projektentwicklung in den Bereichen Digitalisierung, Energie, Mobilität, Gesundheit und Bildung.

Wir bringen Kommunen, Landkreise und Unternehmen zusammen und entwickeln gemeinsam die Infrastruktur für die Zukunft. Die Stärkung des ländlichen Raums steht im Fokus unserer Arbeit.

www.atenekom.eu