

Analyse von Batterietechnologien für die Elektromobilität der Zukunft

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Science (B.Sc.)“ im
Studiengang Wirtschaftsingenieur der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik,
Fakultät für Maschinenbau und der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der
Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Krauth

■■■■■■ ■■■■■■

Vorname: Maurice

■ ■■■■■■

Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

Hannover, den 30. Juni 2016

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abbildungsverzeichnis | III |
| Tabellenverzeichnis | IV |
| Abkürzungsverzeichnis | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Relevanz | 2 |
| 1.3 Zielsetzung | 4 |
| 2 Grundlagen zur Batterietechnologie | 5 |
| 2.1 Aufbau, Funktion und Design einer Batterie | 5 |
| 2.2 Batteriesystem | 8 |
| 2.3 Aktuelle Batterietechnologien | 10 |
| 2.3.1 Blei-Säure-Batterie (PbA) | 10 |
| 2.3.2 Nickel-Cadmium-Batterie (NiCd) | 11 |
| 2.3.3 Nickel-Methallhydrid-Batterie (NiMH) | 12 |
| 2.3.4 Natrium-Nickelchlorid-Batterie (NaNiCl) | 13 |
| 2.3.5 Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion) | 13 |
| 2.4 Zukünftige Entwicklungen | 15 |
| 2.4.1 Lithium-Polymer-Batterie (Li-Poly) | 18 |
| 2.4.2 Zink-Luft-Batterie (Zn-Luft) | 19 |
| 2.4.3 Lithium-Schwefel-Batterie (Li-S) | 20 |
| 2.4.4 Lithium-Luft-Batterie (Li-Luft) | 21 |
| 2.4.5 Natrium-Ionen-Batterie (Na-Ion) | 24 |
| 2.4.6 Magnesium-Ionen-Batterie (Mg-Ion) | 25 |
| 2.4.7 Kohlenstoff-Nanoröhrchen für klimaneutrale Li-Ion- und Na-Ion-Batterien | 26 |
| 2.4.8 Kohlenstoffbatterie | 27 |
| 3 Forschungsdesign | 28 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Literaturanalyse | 31 |
| 3.2 | Identifikation von Bewertungsansätzen für Batterietechnologien | 41 |
| 4 | Vergleich der Zukunftstechnologien anhand der zuvor ermittelten Kriterien ... | 57 |
| 5 | Wissenschaftlicher und praktischer Beitrag | 63 |
| 6 | Handlungsempfehlungen | 64 |
| 7 | Limitationen der Arbeit | 66 |
| 8 | Fazit und Ausblick | 68 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 71 |
| 10 | Anhang | 83 |

1 Einleitung

„Mehr als die Vergangenheit interessiert mich die Zukunft, denn in ihr gedenke ich zu leben.“

Albert Einstein

1.1 Motivation

In Zeiten der globalen Klimaerwärmung, bedingt durch den steigenden Kohlenstoffdioxidausstoß spielen regenerative Energien eine immer größer werdende Rolle. Als regenerative Energien werden Energieträger bezeichnet, die unendlich lange Energie liefern. Zu diesen Energien zählen unter anderem Bioenergie, Windenergie, Sonnenenergie und Wasserkraft.¹ Die Klimaerwärmung, als globales Problem betrifft alle Menschen auf der Welt. Um den Klimawandel zu verlangsamen, beziehungsweise irgendwann komplett zu stoppen, ist es unerlässlich regenerative Energien zu nutzen.

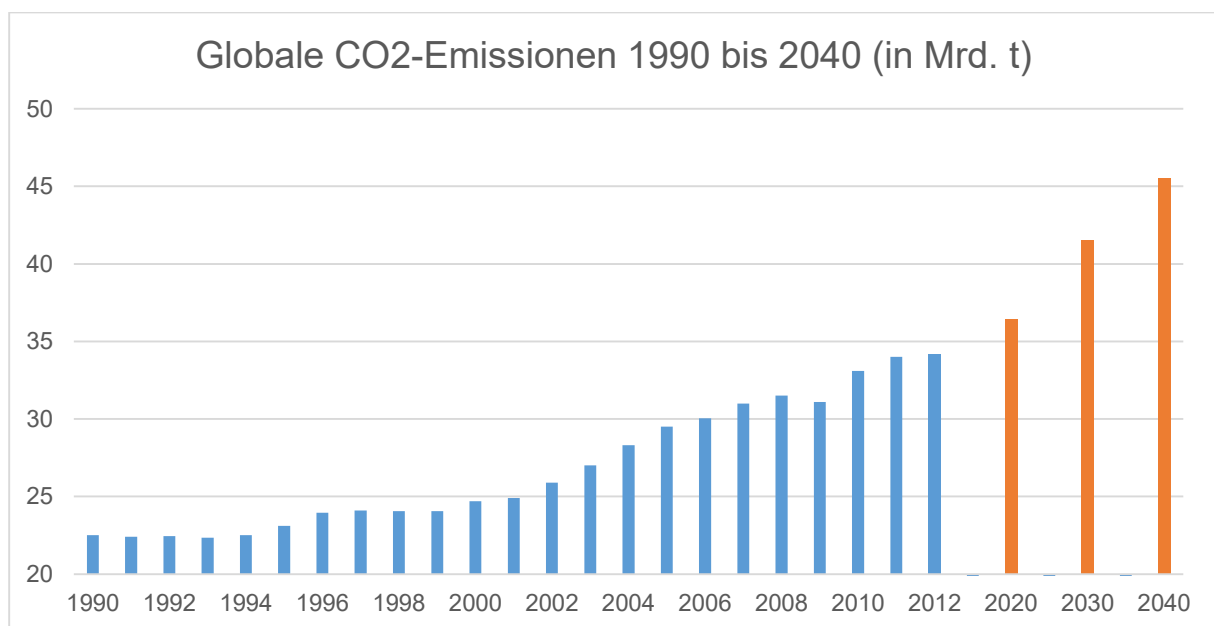


Abbildung 1: Globale CO2-Emissionen 1990 bis 2040 (in Mrd. t)²

¹ Vgl. Umweltbundesamt 2016b

² Eigene Darstellung in Anlehnung an Fahlbusch 2015, S. 32 erweitert um Daten von Contie et al. 2013, S. 159

Von 1990 bis 2014 sind die globalen CO₂-Emissionen um 60% gestiegen. Aus Studien der Internationalen Energieagentur (IEA) geht hervor, dass bis zum Jahr 2035 mit einem weiteren Anstieg von 20 bis 40% zu rechnen ist (siehe Abbildung 1). Die zukünftige Elektromobilität ist ein Faktor der ganzheitlichen Energiewende. Damit die Energiewende nachhaltig ist, muss der Strom durch regenerative Energien erzeugt werden.³

Kraftfahrzeuge stoßen einen nicht unwesentlichen Teil an umweltschädlichen Stoffen aus. Unter anderem fallen Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Stickoxide (NO_x) darunter.⁴ Vor allem Kohlenstoffdioxid als Treibhausgas hat einen großen, negativen Einfluss auf die Klimaerwärmung. Elektrofahrzeuge könnten zu einer signifikanten Emissionsreduktion führen. Damit elektrisch angetriebene Fahrzeuge eine ernstzunehmende Alternative zu Kraftfahrzeugen werden, ist eine Weiterentwicklung der Batterietechnologie notwendig. Diese gilt derzeit als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität.⁵ Die Bundesregierung hat im Zuge dieser Entwicklungen erkannt, dass die Weiterentwicklung und Fertigung von Batterien einen entscheidenden Faktor in der gesamten Wertschöpfungskette von Elektrofahrzeugen bilden.⁶

Im Zuge der zunehmenden Bedeutung einer klimaneutralen Elektromobilität ist es von großer Bedeutung auf die Batterie einzugehen. Sie speichert die für den Antrieb notwendige elektrische Energie. Wie im späteren Verlauf dieser Bachelorarbeit erörtert wird, ist die Batterie der limitierende Faktor in einem Elektrofahrzeug. Daher ist es von großer Wichtigkeit diesen Faktor erheblich weiter zu entwickeln, um zukünftig eine Wettbewerbsfähigkeit zu erreichen.

1.2 Relevanz

Die Abhängigkeit von Öl und Gas ist in den vergangenen Jahren immer stärker in den Vordergrund der Öffentlichkeit getreten. Dabei stellt sich die Frage, wie es weitergeht, wenn die endlichen Ressourcen aufgebraucht sind. Für die Mobilität bedeutet dies, dass eine Abkehr von den fossilen Brennstoffen notwendig ist. Laut der IEA wurden im Jahre 2012 70,8% der weltweiten Energie aus fossilen Brennstoffen erzeugt. Ein Großteil dieser Energie wird für die Mobilität benötigt. Es wird erwartet, dass sich der

³ Vgl. Fahlbusch 2015, S. 13–18

⁴ Vgl. Orth 2007 und NGK Spark Plug Europe GmbH 2016

⁵ Vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 90

⁶ Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) 2015, S. 15–16

weltweite Energiebedarf bis 2050 verdoppeln wird. Der derzeitige Strommix, also die Zusammensetzung des Stroms aus regenerativen und fossilen Energien, wird bei diesen Energieforderungen nicht mehr realisierbar sein.⁷ In Abbildung 2 ist dargestellt, wie sich die Rahmenbedingungen in der Zukunft verändern werden. Zum Beispiel führt die wachsende Bevölkerung zu einem höheren Schadstoffausstoß. Gleichzeitig muss jedoch, in Hinblick auf den Klimawandel, der CO₂-Ausstoß reduziert werden.

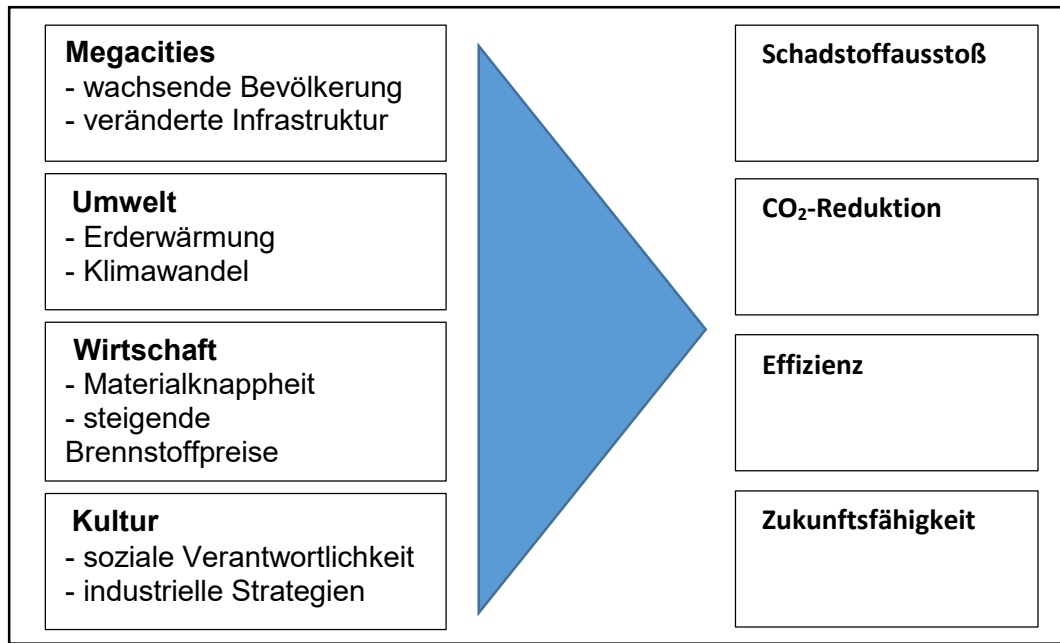


Abbildung 2: *Veränderte Rahmenbedingungen erfordern neue Mobilitätskonzepte*⁸

Zwei im Ansatz verschiedene Konzepte bieten das Potenzial, die Technik für das Auto der Zukunft zu stellen. Zum einen ist dies das Brennstoffzellenfahrzeug, welches seine Energie aus zuvor getanktem Wasserstoff bezieht, und zum anderen das Elektrofahrzeug, welches seine Energie aus Batterien bezieht. Laut dem Autoexperten Eric Heyman von DB Research ist es unwahrscheinlich, dass sich beide Antriebskonzepte durchsetzen werden.⁹ Aber zurzeit ist noch offen, welcher Technologie die Zukunft gehören wird.¹⁰

Die Wettbewerbsfähigkeit von Elektrofahrzeugen hängt stark von der Entwicklung neuer Batterietechnologien ab. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotorfahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen können Elektrofahrzeuge noch nicht innerhalb von wenigen Minuten aufgeladen werden. Zwar sind die Kosten pro Kilowattstunde Speicherkapazität in den letzten Jahren stark gesunken, dennoch bleiben die Batteriesysteme mit etwa 10.000 Euro pro Fahrzeug die teuerste Komponente in

⁷ Vgl. Zhang und Zhang 2015, S. 673

⁸ Eigene Darstellung in Anlehnung an Korthauer 2013, S. 394

⁹ Vgl. Sorge 2014, S. 1–2

¹⁰ Vgl. Völklein 2016, S. 1

jedem Elektrofahrzeug.¹¹ Neben den Kosten spielt auch die Reichweite und die Ladezeit eine Rolle. Elektrofahrzeuge bieten zurzeit eine geringere Reichweite als Kraftfahrzeuge und zusätzlich dauert es länger, die Batterien aufzuladen, als den Tank eines Kraftfahrzeuges aufzufüllen. Dies sind Einschränkungen, die man durch eine Weiterentwicklung der Batterietechnologie versucht zu beheben.

1.3 Zielsetzung

Diese Bachelorarbeit befasst sich ausschließlich mit Batterietechnologien, insbesondere mit Technologien, die in Elektrofahrzeugen eingesetzt wurden, werden oder Potential für einen zukünftigen Einsatz haben. Es wird kein Vergleich mit Brennstoffzellen, Redox-Flow-Speichersystemen oder Doppelkondensatoren (auch Supercaps genannt) vorgenommen.

Zunächst soll der Status Quo in der Batterietechnologie ermittelt werden. Anschließend werden einige sich in der Entwicklung befindliche Technologien vorgestellt. Dabei ist es teilweise schwer vorherzusagen, ob sich die Technologie durchsetzen wird und ob sie in der Elektromobilität eingesetzt werden wird. Mit Hilfe einer strukturierten Literaturanalyse werden verschiedene Bewertungskriterien ermittelt, anhand derer die Technologien analysiert. Die Analyse ergibt eine fundierte Bewertung der Potentiale. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Fazit gezogen und geprüft, welche weitergehenden Forschungsansätze nötig sind, um die in dieser Arbeit vorhandenen Limitationen zu berücksichtigen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es aufzuzeigen, welches Potenzial die Batterietechnologie aufweist. Anhand von verschiedenen Kriterien soll herausgefunden werden, ob es überhaupt eine Technologie gibt, die den Anforderungen der Elektromobilität der Zukunft gerecht wird. Sollte es eine oder mehrere Technologien geben, wird geprüft, welche die vielversprechendste ist. Daraus ergeben sich die beiden folgenden zu untersuchenden Forschungsfragen:

1. Werden die Zukunftstechnologien den Anforderungen gerecht?
2. Welche Technologie bietet die besten Voraussetzungen für die Elektromobilität der Zukunft?

¹¹ Vgl. Asendorpf 2015, S. 3

Es existiert eine Fülle an verschiedenen Büchern, Artikeln und Konferenzberichten zum Thema Batterien. Auch werden verschiedenste Aspekte zu diesem Thema behandelt. Vergleiche der Batterien gibt es zwar schon, aber noch nicht in Verknüpfung mit allen in dieser Bachelorarbeit behandelten Kriterien.

2 Grundlagen zur Batterietechnologie

Batterien werden im Alltag eine immer größere Rolle spielen. So sind sie nicht nur für die Elektroautoindustrie wichtig, sondern auch für sämtliche andere mobile Endgeräte. Auch für die stationäre Speicherung von regenerativen Energien, die in der Zukunft einen immer größer werdenden Anteil am Strommix haben werden, sind Batterien notwendig.¹² Bei den mobilen Endgeräten stechen vor allem die immer dünner und gleichzeitig leistungsstärker werdenden Smartphones, Tablets und Notebooks hervor.¹³

Ziel dieses Kapitels ist es, dem Leser zu vermitteln, wie eine Batterie aufgebaut ist und wie sie funktioniert. Es soll ein Überblick über die derzeit auf dem Markt befindlichen Batterietechnologien verschafft werden. Darüber hinaus werden verschiedene, auch in Konkurrenz zueinanderstehende Entwicklungsansätze der Batterietechnologie aufgezeigt, die den steigenden Anforderungen gerecht werden sollen.

2.1 Aufbau, Funktion und Design einer Batterie

Eine Batterie ist ein elektrochemischer Energiespeicher, der aus mehreren, in Reihe oder Parallel oder einer Kombination aus beiden, galvanischen Zellen¹⁴ besteht und in einem Gehäuse untergebracht ist.¹⁵ Sie wandelt chemische Energie in elektrische Energie um. Oftmals wird der Begriff Batterie auch dann verwendet, wenn eigentlich nur eine Zelle betrachtet wird. Dies ist meistens der Fall, wenn die chemischen Vorgänge in einer Zelle beschrieben werden sollen.¹⁶ Eine galvanische Zelle (Element)

¹² Vgl. Umweltbundesamt 2016a

¹³ Vgl. Korthauer 2013, S. 3

¹⁴ Vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 104

¹⁵ Vgl. Hofmann et al. 2007, S. 113

¹⁶ Vgl. Linden und Reddy 2002, S. 1.3

Punkt eines Reviews dar. Diese konnten im Rahmen einer Bachelorarbeit nicht entwickelt oder erweitert werden.

8 Fazit und Ausblick

Anthropogener Treibhauseffekt, Klimawandel und begrenzte Ressourcen drängen immer stärker in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Die Elektromobilität gilt als mögliche Lösung, um dem steigenden CO₂-Ausstoß entgegenzuwirken. Größtes Problem der Elektromobilität sind die noch nicht ausreichend leistungsfähigen Batterien. Deshalb nimmt diese Bachelorarbeit die Probleme der Batterietechnologien auf, indem verschiedene Batterietechnologien vorgestellt, auf ihrer Eignung in Elektrofahrzeugen überprüft und miteinander verglichen wurden. Zunächst wurden etablierte Batterietechnologien vorgestellt. Dabei steht vor allem die Li-Ion-Batterie im Mittelpunkt der Analyse. Denn diese weist deutlich bessere Eigenschaften auf als die konkurrierenden Batterietechnologien. Im nächsten Abschnitt werden zukünftige bzw. sich in der Entwicklung befindliche Batterietechnologien erörtert. Hierbei ist hervorzuheben, dass einige Batterien nicht für den Einsatz in Elektroautos geeignet sind. Dies gilt zum Beispiel für die Zn-Ion-Batterie, da diese eine zu geringe Energiedichte aufweist. Die Li-Poly-Batterie bietet nicht unbedingt eine höhere Energiedichte als Li-Ion-Batterien. Interessant ist sie dennoch, da sie im Vergleich mit Li-Ion-Batterien in bestimmten Bereichen sicherer ist. Dies ist ein, wie sich im späteren Verlauf der Arbeit herausstellte, nicht zu vernachlässigender Aspekt. Eine hohe Energiedichte bieten die vielversprechenden Li-S- und Li-Luft-Batterien.

Die eigentliche Analyse und strukturierte Literaturrecherche und -auswertung fand in den Kapiteln 3.1 und 3.2 statt. Hier werden die relevanten Kriterien für eine Bewertung von Batterietechnologien identifiziert und erörtert. Dabei hat sich herausgestellt, dass Sicherheit und Lebensdauer Schlüsselkriterien für Batterien sind, die in Elektroautos eingesetzt werden sollen. Teilweise konnten Kriterien nicht betrachtet werden, da schon während der Recherche in der Datenbank aufgefallen ist, dass die Vergleichbarkeit zwischen den Batterietechnologien nicht gegeben ist (SoC, SoH, etc.). Bei anderen Kriterien wurde die fehlende Vergleichbarkeit erst bei der Auswertung deutlich (CO₂-Ausstoß, Effizienz, etc.). Trotz einiger Limitationen konnte in einem Vergleich der Lithium-Ionen-Batterievarianten die LFP-Batterie aufgrund der hohen Sicherheit und der vergleichsweise geringen Kosten als beste Li-Ion-Batterie identifiziert werden. Im Vergleich mit den sich in der Entwicklung befindlichen

Technologien wurde deutlich, dass derzeit keine Batterie den gestellten Anforderungen gerecht wird. Die Li-S- und die Li-Luft-Batterien wurden allerdings als die Technologien erkannt, die das größte Potential bieten die Batterietechnologie der Zukunft zu stellen. Aber zurzeit werden diese den gestellten Anforderungen (vgl. Tabelle 8) noch nicht in allen Punkten gerecht. Es ist noch nicht absehbar, ob und wann die technischen Probleme behoben werden. Sobald die Probleme jedoch behoben sind, können die Reichweite und unter Umständen auch die Ladedauer von Elektrofahrzeugen erheblich verbessert werden, so dass Elektroautos zu einer echten Alternative zu Kraftfahrzeugen werden.

Die Elektromobilität wird in der nahen Zukunft immer wichtiger. Alle großen Autohersteller beschäftigen sich mit rein elektrischen Fahrzeugen. BMW hat zum Beispiel mit dem i3 ein Elektroauto im Produktangebot.²²⁶ Volkswagen und Daimler bieten teilweise elektrische Versionen aus ihren Modellpaletten an (VW e-Golf, VW e-Up, B-Klasse).²²⁷ Volkswagen-Chef Matthias Müller hat gerade erst auf der Vorstellung der Unternehmensstrategie die Elektromobilsparte besonders betont. Der Konzern solle für das „neue Zeitalter der Mobilität“ umstrukturiert werden. Dazu soll ein zweistelliger Milliardenbetrag investiert werden.²²⁸ Auch fachfremde Unternehmen wie Google greifen zunehmend in den Markt ein und entwickeln eigene Elektroautos.²²⁹ Dies verdeutlicht, welches Potential der Elektroautomarkt bietet. Das gemeinsame Problem aller Konkurrenten ist jedoch die limitierte Reichweite und die relativ lange Ladedauer. Beide Probleme können nur mit starken Verbesserungen in der Batterietechnologie gelöst werden.

Die Anreize, eine Lösung zu finden, werden dadurch gesteigert, dass der Markt für Batterien groß ist und er in der Zukunft durch die steigende Anzahl an Elektrofahrzeugen noch wachsen wird. Die Bundesregierung hat als Ziele gesetzt, dass bis 2020 eine Million Elektroautos und bis 2030 sechs Millionen Elektroautos auf der Straße unterwegs sein sollen. Um diese Ziele zu erreichen, werden verschiedene Anreize geschaffen: z. B. Steuererleichterungen, Sonderparkflächen und Versicherungsvorteile.²³⁰ Zusätzlich wurde am 18.04.2016 beschlossen, dass Käufer eines Elektroautos bis zu 4000 Euro Prämie erhalten, da das Ziel von einer Million Elektroautos bisher verfehlt wurde.²³¹ Durch den großen Bedarf an zukunftstauglichen Batterietechnologien wird die Forschung zunehmend intensiviert, um Lösungen für das

²²⁶ Vgl. <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/bmw-i/philosophy.html> (zuletzt geprüft am 20.06.2016)

²²⁷ Vgl. Breiting 2016

²²⁸ Vgl. Pressemitteilung der Volkswagen AG 16.06.2016

²²⁹ Vgl. Kuri 2014

²³⁰ Vgl. Bundesregierung 2016; Steffen 2015

²³¹ Vgl. Lauter 2016

Ladedauer- und Reichweitenproblem zu finden. Allein die Bundesregierung hat für die Batterieforschung Mittel in Höhe von zwei Milliarden Euro bewilligt.²³²

Schlussendlich lässt sich sagen, dass noch nicht genau feststeht, wann der Durchbruch für die Elektromobilität erfolgt. Konkurrenztechnologien wie die Brennstoffzellentechnik könnten auch einen Durchbruch von Elektroautos verhindern und selbst zur dominierenden Technologie avancieren. Ob dieses Szenario eintritt, hängt stark von der Forschung und Entwicklung in den Gebieten der Batterie- und Brennstoffzellentechnik ab. Daher sollten sich Reviews auch mit einem Vergleich dieser unterschiedlichen Technologien beschäftigen. Mit der Umstrukturierung der Volkswagen AG hat Matthias Müller bestätigt, welchen Stellenwert er der Elektromobilität einräumt. Auch Daimler-CEO Dieter Zetsche ist sich sicher, dass die Elektromobilität die erhoffte Lösung bieten wird. Dies wird durch folgendes Zitat deutlich.

„Die Elektromobilität ist die Technik der Zukunft.“

Daimler-CEO Dieter Zetsche im Interview mit der Automobil Industrie²³³

²³² Vgl. Bundesregierung 2016

²³³ Otto 2015