

# **E-Mobilität: Chancen und Herausforderungen**

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

Name: Lehmkuhl



Vorname: Ole



Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

Hannover, den 14.10.2019

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>III</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>IV</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>V</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2 EINFÜHRUNG ELEKTROMOBILITÄT .....</b>	<b>3</b>
2.1 Definition Elektromobilität.....	3
2.2 Ausführungsformen von Elektrofahrzeugen .....	3
2.2.1 Reines Elektrofahrzeug (Battery Electric Vehicle - BEV) .....	3
2.2.2 Hybrid-Elektrofahrzeuge (Hybrid Electric Vehicle – HEV).....	4
2.2.2.1 Mikrohybrid .....	5
2.2.2.2 Mildhybrid.....	6
2.2.2.3 Vollhybrid .....	6
2.2.2.4 Plug-In-Hybrid (Plug-In Hybrid Electric Vehicle - PHEV).....	7
2.2.3 Elektrofahrzeug mit Range-Extender (Range Extended Electric Vehicle – REEV) .....	7
2.2.4 Antriebsstruktur der Hybride.....	8
2.2.4.1 Serieller Hybrid .....	8
2.2.4.2 Paralleler Hybrid .....	8
2.2.4.3 Misch-Hybrid.....	8
2.2.5 Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle – FCHEV).....	9
<b>3 MARKTPENETRATION.....</b>	<b>11</b>
3.1 Marktanteil .....	11
3.2 Forschungsvorhaben BeEmobil .....	12
3.3 Internationaler Vergleich .....	14
<b>4 LADEINFRASTRUKTUR.....</b>	<b>16</b>
4.1 Ladetechnologien .....	17
4.2 Öffentliche Ladeinfrastruktur .....	19
4.3 Anforderungen an die Netzinfrastruktur .....	26
4.3.1 Stromerzeugung .....	26
4.3.2 Herausforderungen.....	26
4.3.3 Chancen zur Netzstabilisierung .....	28
4.4 Zusammenfassung.....	32
<b>5 BATTERIETECHNOLOGIE .....</b>	<b>34</b>
5.1 Batterietypen .....	36

Seite II

5.2	Lithium-Ionen-Batterie (LIB) .....	38
5.2.1	Rohstoffe.....	41
5.2.1.1	Lithium .....	43
5.2.1.2	Mangan .....	46
5.2.1.3	Kobalt.....	47
5.2.1.4	Nickel .....	50
5.2.1.5	Graphit .....	51
5.3	Zusammenfassung.....	52
<b>6</b>	<b>LIMITATION DER ARBEIT .....</b>	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK.....</b>	<b>56</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>59</b>
	<b>ANHANG.....</b>	<b>65</b>

# 1 Einleitung

*„Es erscheint mir offensichtlich, dass wir es nicht länger künftigen Generationen überlassen können, etwas gegen den Klimawandel zu unternehmen.“*

(Papst Franziskus)

Es ist womöglich das zentrale Thema des 21. Jahrhunderts – Der Klimawandel. Feststellbar ist, dass die globale Erwärmung Gegenstand politischer, wirtschaftlicher oder gesellschaftlicher Diskurse ist und seit nunmehr vielen Monaten das bestimmende Thema in den Medien darstellt. Greta Thunberg, ein 16-jähriges Mädchen aus Schweden, entwickelt sich seither zur Symbolfigur des Klimawandels. Nicht selten fordert sie die Gesellschaft zu klimafreundlichen Verhaltensweisen auf und stößt dabei immer wiederkehrend nicht endende Debatten an.

Laut aktueller Studien beträgt die durchschnittliche jährliche Abgabe eines Deutschen von Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten in die Atmosphäre circa 11,3 Tonnen. Das Auto und die Mobilität stehen hierbei regelmäßig im Zentrum und nehmen pro Haushalt ungefähr 26,6 % der gesamten Emissionen ein.<sup>1</sup> Die räumliche Mobilität des Einzelnen, die seit jeher als zunehmend beschrieben werden kann, konnte sich in den vergangenen Jahrzehnten auf herkömmliche Verbrennungsmotoren verlassen. Allerdings sorgen Umweltaktivisten, Debatten, Organisationen oder Projekte, deren Dogma der Umweltschutz darstellt, für ein Umdenken in diesem Themengebiet. Folglich rückt der Aspekt der Nachhaltigkeit, und daher die Förderung von Elektromobilität, immer mehr in den Vordergrund. Heutzutage lässt sich feststellen, dass sich die Automobilindustrie dieser Verantwortung durchaus bewusst ist, doch klärende Fragen weiterhin offen sind. Wie kann der Autoverkehr verringert oder umweltfreundlicher gestaltet werden? Welche Möglichkeiten gibt es in Deutschland, um eine Elektromobilität gewinnbringend zu fördern und welchen Entwicklungsstand gibt es hierzulande gegenwärtig?

Eine gänzliche Beantwortung dieser Fragen kann im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht erfolgen, da es den Rahmen in nicht vorstellbarem Maße übersteigen würde. Daher stehen im Fokus dieser Arbeit zwei entscheidende Einflussfaktoren für die weitere Entwicklung der Elektromobilität: die Ladeinfrastruktur und die Batterietechnologie.

Hinsichtlich dieser Einflussfaktoren ist das Ziel dieser Arbeit aufzuzeigen, welche Chancen die Elektromobilität bietet und vor welchen Herausforderungen diese steht. Welche Chance bietet ein flächendeckendes Netz an öffentlichen Ladestationen für

---

<sup>1</sup> Vgl. Kumpfmüller 12. Juli 2019

Elektrofahrzeuge und vor welchen Herausforderungen stehen die deutschen Stromnetze bei einer steigenden Elektrifizierung des Verkehrs? Vor welchen Herausforderungen steht die Batterieindustrie? Kann der exponentiell steigende Bedarf an Rohstoffen langfristig gedeckt werden?

## 1.1 Aufbau der Arbeit

Nachdem im ersten Kapitel der Fokus dieser Arbeit festgelegt und ein Überblick über die Relevanz des Themas gegeben wurde, werden im zweiten Kapitel die unterschiedlichen Ausführungsformen von batteriebetriebenen Fahrzeugen vorgestellt. Im darauffolgenden Kapitel wird kurz auf die derzeitige Marktsituation von Elektrofahrzeugen in Deutschland eingegangen. Hierbei erfolgt auch ein internationaler Vergleich, um zu zeigen, dass die Entwicklung der Elektromobilität in anderen Ländern zum Teil deutlich fortgeschrittener ist als in Deutschland.

Die Kapitel vier und fünf bilden den Schwerpunkt dieser Arbeit. In Kapitel vier werden die Situation und die Entwicklung bezüglich der Ladeinfrastruktur ausführlich dargestellt. Neben einer Wirtschaftlichkeitsberechnung bezüglich des Betriebes einer Ladesäule, wird explizit auf die zukünftigen Anforderungen an die Netzinfrastruktur eingegangen. Im Kapitel „Batterietechnologie“ werden zunächst die verschiedenen Batterietypen vorgestellt, die in der Elektromobilität bislang zum Einsatz kamen. Danach liegt der Fokus auf der Lithium-Ionen-Batterie. Hierbei wird der zukünftige Bedarf der Automobilbranche an den wesentlichen Rohstoffen einer Lithium-Ionen-Batterie berechnet und dargestellt, welche ökonomischen und ökologischen Auswirkungen die steigende Minenproduktion hat.

Abschließend erfolgt im letzten Kapitel eine Darstellung der Herausforderungen und Chancen der Elektromobilität in Bezug auf die Ladeinfrastruktur und die Batterietechnologie und endet mit einem Ausblick, wie die Klimabilanz eines Elektrofahrzeugs in Zukunft weiter verbessert werden kann.

Da es sich bei der Elektromobilität um ein sehr dynamisches und aktuelles Thema handelt, wurde insbesondere in den Kapiteln „Marktpenetration“ und „Ladeinfrastruktur“ des Öfteren auf Internetquellen zurückgegriffen. Des Weiteren wurde zum Thema Ladeinfrastruktur ein Interview mit einem Mitarbeiter eines Elektromobilitätsdienstleisters durchgeführt (siehe Anhang).

Obwohl es sich bei den Energiespeichern von Elektrofahrzeugen grundsätzlich um Akkumulatoren und nicht um Batterien handelt, wird der Begriff „Batterie“ in der folgenden Arbeit als Synonym für Akkumulator verwendet.

## 7 Fazit und Ausblick

Im November 2016 verabschiedete die deutsche Bundesregierung den Klimaschutzplan 2050. Um die darin enthaltenen Klimaschutzziele zu erreichen, hat sich die Bundesregierung zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 Prozent, bis 2030 um 55 Prozent und bis 2040 um 70 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu senken.<sup>136</sup> Demnach dürfen die Treibhausgasemissionen im kommenden Jahr nur noch rund 750 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid(CO<sub>2</sub>)-Äquivalente betragen, da diese 1990 ungefähr 1.250 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente betragen.

2016 konnten die Treibhausgasemissionen schon um knapp 28 Prozent reduziert werden. Dabei verzeichnete der Sektor Energiewirtschaft die größte absolute Reduktion der CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Jedoch wurden auch in den Sektoren Industrie, Gebäude, Landwirtschaft und Sonstige weniger Treibhausgasemissionen ausgestoßen als 1990. Einzig im Sektor Verkehr konnte 2016 keine Reduktion gegenüber 1990 verzeichnet werden, hier nahmen die Treibhausgasemissionen sogar um knapp 2 Millionen Tonnen zu. Verantwortlich für den Anstieg der Emissionen ist der Straßenverkehr. Denn während im Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr die Treibhausgasemissionen zurück gingen beziehungsweise konstant blieben, wurden 2016 im Straßenverkehr deutlich mehr schädliche Gase ausgestoßen als in der Vergangenheit, da die Verkehrsleistung stetig angestiegen ist und elektrisch betriebene Fahrzeuge bislang kaum ein Faktor waren.<sup>137</sup> Jedoch zeigen die heutigen Absatzzahlen, dass die Elektromobilität zunehmend an Bedeutung gewinnt und der Anteil batteriebetriebener Fahrzeuge immer größer wird (siehe 3.1).

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Elektromobilität nicht nur dafür sorgen kann, dass die Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr verringert werden, sondern obendrein weitere Chancen bietet, die es zu nutzen gilt, um die Vorteile der Elektromobilität maximal zu nutzen.

Die größte Chance der Elektromobilität ist, dass sie einen außerordentlichen Beitrag zur Energiewende leisten kann, indem Elektrofahrzeuge als temporäre Stromspeicher dienen. Voraussetzung dafür ist, dass eine flächendeckende Ladeinfrastruktur vorhanden ist und somit elektrisch betriebene Fahrzeuge jederzeit und überall an das Stromnetz angeschlossen werden können. Insbesondere hier ist die Entwicklung durchaus positiv, da die Anzahl öffentlicher Ladestationen in den letzten Monaten deutlich zunahm (siehe 4.2). Eine weitere Voraussetzung dafür ist, dass Elektrofahrzeuge mit dem Vehicle-to-Grid (V2G) System ausgerüstet werden und somit einerseits Strom

---

<sup>136</sup> Vgl. Bundesregierung

<sup>137</sup> Vgl. Emele et. al. 2019

aus dem Netz entnehmen können und andererseits Strom in das Netz einspeisen können. Aufgrund des steigenden Anteils der erneuerbaren Energien treten immer häufiger Lastspitzen und Energieüberschüsse auf (siehe 4.3.2), da Ort und Zeitpunkt von Energieproduktion und –verbrauch oftmals unterschiedlich sind. Falls Elektrofahrzeuge nun als temporäre Stromspeicher dienen, könnten diese Strom bei einem Energieüberschuss abnehmen und Strom bei Lastspitzen in das Netz einspeisen. Folgendes Beispiel verdeutlicht das: Bei 1 Million Elektrofahrzeugen mit einer 40 kWh-Batterie müssen nur 10 Prozent an das Stromnetz angeschlossen sein, um dem Netzbetreiber eine positive oder negative Regelleistung von 4 Gigawatt als Puffer bereitzustellen, womit auftretende Netzschwankungen problemlos ausgeglichen werden können.<sup>138</sup> Dadurch können zum einen mehr erneuerbare Energien in das Netz eingespeist werden und zum anderen der kostenintensive Netzausbau verhindert werden.

Eine Herausforderung bezüglich der Ladeinfrastruktur stellt die gegenwärtige geringe Wirtschaftlichkeit (siehe 4.2) beim Betreiben einer öffentlichen Ladesäule dar. Damit auch in den nächsten Jahren weitere öffentliche Ladesäulen, insbesondere in bevölkerungsschwachen Regionen, dazu kommen, sind weitere Fördermaßnahmen seitens der Bundesregierung notwendig, um die Entwicklung der Elektromobilität fortzuführen.

Des Weiteren zeigt die Arbeit, dass die Elektromobilität hinsichtlich der Batterietechnologie vor einer großen Herausforderung steht (siehe 5). Zwar sorgt die steigende Elektrifizierung des Verkehrs in Deutschland zu einer Reduktion der inländischen Treibhausgasemissionen, jedoch gilt es zu berücksichtigen, dass bei der Batterieherstellung globale Treibhausgasemissionen verursacht werden. Die Produktion einer NCM-Batterie beispielsweise, erzeugt derzeit rund 105,6 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente je kWh Batteriekapazität.<sup>139</sup> Zudem hat die steigende Minenproduktion der erforderlichen Rohstoffe zumeist weitreichende Auswirkungen auf das Ökosystem (siehe 5.2). So verdunsten zum Beispiel in Südamerika für eine Tonne Lithium rund 2 Millionen Liter Wasser, weshalb eine ganze Region gefährdet ist, auszutrocknen.<sup>140</sup> Unabhängig von den Auswirkungen auf die Umwelt, wird in dieser Arbeit ebenfalls deutlich (siehe 5.2), dass speziell die Minenproduktion von Lithium, Nickel und Kobalt rapide steigen muss, um den zunehmenden Bedarf zukünftig vollständig decken zu können.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen noch deutlich verbessert werden kann. Dieses ist eine Chance der Elektromobilität, zugleich

---

<sup>138</sup> Vgl. Bundesregierung 2015

<sup>139</sup> Vgl. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. 2019

<sup>140</sup> Vgl. Schneider & Thurn 2019

aber auch eine Herausforderung. Zum einen muss der Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix weiter steigen und zum anderen müssen insbesondere die Vorkettenemissionen bei der Batterieherstellung erheblich verringert werden. Hier muss das Ziel der Batterieindustrie sein, entweder alternative Batterietechnologien auf den Markt zu bringen, die den Abbau von Rohstoffen wie Lithium, Nickel oder Kobalt nicht erfordern oder Batterien in Verbindung mit der Recyclingindustrie herzustellen, die größtenteils aus recyceltem Material bestehen.