

Technologieakzeptanz und Wirtschaftlichkeit der Elektromobilität

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M.Sc.)“ im Masterstudiengang Wirtschaftswissenschaft der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Rode

████████████████████

Vorname: Stephan André

████████████████

Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

Hannover, den 29.08.2012

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung.....	3
1.4 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Entwicklung der Elektromobilität	6
3 Grundlagen der Elektromobilität	9
3.1 Definition Elektromobilität.....	9
3.2 Antriebstechniken.....	10
3.2.1 Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge	10
3.2.2 Elektro-Hybridfahrzeuge.....	13
3.2.2.1 Mikro-Hybrid	13
3.2.2.2 Mild-Hybrid	14
3.2.2.3 Voll-Hybrid.....	14
3.2.2.4 Plug-In-Hybrid.....	15
3.2.2.5 Serieller-Hybrid	16
3.2.2.6 Paralleler-Hybrid.....	18
3.2.2.7 Misch-Hybrid.....	19
3.2.3 Wasserstoffbetriebene Elektrofahrzeuge.....	20
3.2.4 Batterietypen	23
3.2.4.1 Blei-Akkumulator	26
3.2.4.2 Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH).....	27
3.2.4.3 Natrium-Nickel-Chlorid-Batterie (NaNiCl).....	27

II

3.2.4.4	Lithium-Ionen-Akkumulator.....	28
3.3	Potenziale der Elektromobilität	29
3.3.1	Vermeidung von CO ₂ -Emissionen	29
3.3.2	Verringerung der Emissionen im Stadtbereich	30
3.3.3	Schonung fossiler Ressourcen.....	31
3.3.4	Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt für Elektromobilität	32
3.3.5	Integration der Fahrzeuge in das Stromnetz.....	33
4	Technologieakzeptanz aus Kundensicht	35
4.1	Barrieren für eine breite Ausdehnung der Elektromobilität aus Kundensicht.....	35
4.2	Ladetechnologien.....	37
4.2.1	Kabelgebundenes Laden	38
4.2.1.1	Funktionsweise und technische Informationen.....	38
4.2.1.2	Normung und Standardisierung	42
4.2.1.3	Kundenanforderungen an Ladeinfrastruktur	44
4.2.2	Kabelloses Laden	45
4.2.3	Batteriewechselstationen.....	47
4.2.4	Wasserstofftankstelle	48
4.3	Geschäftsmodelle.....	49
4.3.1	Fahrzeugkauf.....	49
4.3.2	Fahrzeugleasing.....	50
4.3.3	Batterieleasing.....	52
4.3.4	Car-Sharing	53
4.3.5	Better Place	54
4.4	Sonstige Anreize.....	55
4.4.1	Nicht-monetäre Anreize	55
4.4.2	Monetäre Anreize	58
5	Wirtschaftlichkeit der Elektromobilität.....	60

III

5.1	Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit.....	60
5.1.1	Ökonomische Einflussgrößen	60
5.1.2	Technisch-ökonomische Einflussgrößen.....	63
5.1.3	Politisch-ökonomische Rahmenbedingungen	71
5.2	Grundannahmen der Simulation.....	78
5.3	Fahrzeugdaten der Vergleichsfahrzeuge	80
5.4	Darstellung und Erklärung des Excel-Simulations-Tools	81
5.5	Auswertung der Ergebnisse der Szenarioanalyse.....	86
5.5.1	Szenario Kleinwagen.....	86
5.5.1.1	Laufleistung 10.000 km	86
5.5.1.2	Laufleistung 20.000 km	88
5.5.1.3	Laufleistung 50.000 km	90
5.5.2	Szenario Mittelklassewagen.....	92
5.5.2.1	Laufleistung 10.000 km	92
5.5.2.2	Laufleistung 20.000 km	94
5.5.2.3	Laufleistung 50.000 km	96
5.5.3	Szenario Sportwagen.....	98
5.5.3.1	Laufleistung 10.000 km	98
5.5.3.2	Laufleistung 20.000 km	100
5.5.3.3	Laufleistung 50.000 km	102
5.6	Bewertung, Reflektion und kritische Würdigung der Szenarien.....	104
5.7	Öko-Bilanz.....	106
6	Zusammenfassung und Fazit.....	112
	Literaturverzeichnis.....	119
	Anhang	IX

1 Einleitung

„Die Zukunft gehört dem, der als erster die Kraft der Sonne in den Tank packt, mit Wasserstoff überholt oder CO₂-frei vorankommt.“¹

1.1 Ausgangssituation

Die Bedürfnisse und Möglichkeiten mobil zu sein, waren wohlmöglich noch nie so groß wie heute.² Das Automobil ist heutzutage in Industrieländern der, mit großem Abstand, primäre Träger dieser Mobilität. Dazu gehören modernste Fahrzeuge und ein gut ausgebautes Straßennetz. Auch in Schwellen- und Entwicklungsländern nimmt die Bedeutung bezüglich individueller Mobilität stetig zu. Die Pkw-Motorisierung gilt sogar als Schlüsselindikator für den Entwicklungsstand einer Volkswirtschaft. Somit ist das Auto heute allgegenwärtig und ein kultur- und zivilisationsübergreifendes, globales Phänomen.

Elektrofahrzeuge sind dabei keine Erfindung der letzten Jahre, in denen die Klimaproblematik und die immer knapper werdenden Erdölvorkommen vermehrt in den Fokus gerückt sind. Bereits um 1900 konkurrierten verschiedene Antriebskonzepte um die Vormachtstellung am Markt. Der Verbrennungsmotor konnte sich jedoch seiner Zeit durchsetzen.

Heute ist das Thema Elektromobilität wieder in aller Munde. Es vergeht nahezu kein Tag, an dem nicht in den Medien über dieses Thema berichtet wird. Das allgemeine und politische Interesse ist groß, da die Elektromobilität im Energiesystem der Zukunft eine große Rolle spielen könnte. Treiber dieser Entwicklung sind die aktuellen Diskussionen über CO₂-Emissionen, Klimawandel und die Verknappung der Erdölreserven. Hinzu kommen nationalstaatliche und europaweite Verpflichtungen den CO₂-Ausstoß von Neufahrzeugen gemäß EU-Vorgaben, auf eine bestimmte Menge zu reduzieren. Für Erdöl beträgt die so genannte statistische Reichweite rund 41 Jahre.³ Dieser Wert ergibt sich durch Division, der aus heutiger Sicht technisch und wirtschaftlich abbaubaren Reserven und des heutigen Verbrauches. Aus diesen Gründen werden Fahrzeuge mit sauberem Strom aus erneuerbaren Energien gefordert. Das Ziel ist die Unabhängigkeit von erdölexportierenden Ländern, die Schonung von Ressourcen und die Vermeidung von Schadstoffen, insbesondere in Ballungszentren. Dieses Ziel soll durch die Weiterentwicklung der Fahrzeugbatterien erreicht werden. Diese könnten in

¹ Horst Köhler bei der ADAC Preisverleihung Gelber Engel, 14. Januar 2010.

² Vgl. hierzu und zum Folgenden Shell Deutschland Oil GmbH (2009), S. 4.

³ Vgl. hierzu und zum Folgenden BUND (2010), o. S..

Zukunft höhere Reichweiten aufweisen, aber auch zu einer Zwischenspeicherung von Energie und somit zu einer Stabilisierung des gesamten Stromnetzes sorgen.

Dieses Potential und die Notwendigkeit eines alternativen Antriebskonzeptes wurden auch von der Bundesregierung erkannt. Sie hat dazu den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität ins Leben gerufen. Das Ziel dieser Organisation ist es, die Forschung und Entwicklung, die Marktvorbereitung und die Markteinführung in Deutschland zu unterstützen und voranzubringen.⁴ Das Ziel der Bundesregierung sind eine Million Elektroautos auf deutschen Straßen bis zum Jahr 2020. Dieses Ziel erscheint ehrgeizig und es ist fraglich ob es unter den gegebenen Voraussetzungen erreicht werden kann.

1.2 Problemstellung

Um eine Million Fahrzeuge mit Elektroantrieb auf deutschen Straßen zu realisieren sind in naher Zukunft zahlreiche Herausforderungen zu bewältigen. Ein großes Problem sind dabei die hohen Kosten. Damit sind nicht nur die, im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen, relativ hohen Anschaffungskosten gemeint, sondern auch die Investitionen in die Infrastruktur. Die flächendeckende Installation von Ladestationen und der Ausbau der Stromnetze verursachen hohe Kosten. Denn sollten in Zukunft alle Elektrofahrzeugnutzer ihr Fahrzeug nach Feierabend an einer Steckdose laden, könnte es zu Überlastungen der Transformatoren kommen. Diese sind derzeit nicht für diese Kapazität ausgelegt und müssten ebenfalls ausgetauscht werden. Dabei ist es noch unklar wer diese Kosten zu tragen hat.

Die kurzen Reichweiten der Fahrzeuge machen es erforderlich, dass eine Lademöglichkeit jederzeit gegeben ist. Ist diese Voraussetzung nicht gegeben, werden potenzielle Kunden Elektrofahrzeuge meiden. Doch selbst wenn jederzeit Ladestationen erreichbar wären, würden die langen Ladezeiten, von oft mehreren Stunden, zu starken Nutzungseinschränkungen führen. Ladevorgänge mit Stromanschlüssen höherer Leistung verkürzen die Ladezeit zwar auf 30 Minuten, eine Ladedauer wie bei der Betankung von Benzin- und Diesel-Pkw erscheint jedoch unerreichbar. Bei Strecken von über 150 km würde sich die Fahrzeit somit um 30 Minuten erhöhen. Diesen Komfortückschritt sind viele Kunden nicht bereit hinzunehmen. In der aktuellen Diskussion sind sich jedoch alle Akteure einig, dass die Massentauglichkeit der Elektromobilität entscheidend von dem Preis-Leistungsverhältnis der Fahrzeuge abhängig ist.

⁴ Vgl. hierzu und zum Folgenden Die Bundesregierung (2009), S. 2.

Neben der Infrastrukturproblematik und der somit fehlenden Lademöglichkeit für Elektroautos, stellen die Batterien in den Fahrzeugen die zweite große Herausforderung dar. Sie erfüllen mit Reichweiten um die 150 km noch lange nicht die Anforderungen der Nutzer. Die Reichweite kann sich jedoch im Winter, bei kalten Temperaturen, auf bis zu 50 Prozent reduzieren. Außerdem unterliegen die Batterien einem Verschleiß, wie er bei Notebook- oder Mobiltelefon-Akkus bekannt ist. Speicherkapazität, Ladedauer und Haltbarkeit der Batterien sind somit als weiteres Hindernis für den Durchbruch der Elektromobilität zu nennen.

Studien belegen zudem immer wieder, dass Elektrofahrzeuge nicht automatisch die Lösung des Klimaproblems sind. Denn wird der Strom für die Fahrzeuge bspw. aus Braunkohlekraftwerken gewonnen, werden sämtliche CO₂-Vorteile wieder aufgebraucht. Hinzu kommt die fehlende Akzeptanz potenzieller Nutzer. Sie sind oft nur mangelhaft über das Thema Elektromobilität informiert. Dies kann der Fall durch ständig neue Meldungen in den Medien über neue Technologien sein. Bei dem Nutzer kann das zu Verwirrung führen. Sind zusätzlich Ladestecker, Ladestationen oder Batteriewechselstationen nicht einheitlich genormt, wird die Verunsicherung weiter verstärkt. Die Kunden wissen somit letztendlich nicht warum und wofür sie den hohen Mehrpreis für Elektrofahrzeuge zahlen sollen, wenn sie zusätzlich noch auf lange Reichweiten und ein ausgebautes Tankstellennetz verzichten sollen. Als mögliche Antwort könnten die im Vergleich zu Benzin und Diesel geringen Stromkosten sprechen. Es ist jedoch nur noch eine Frage der Zeit wann die hohe Mineralölsteuer, die auf Benzin und Diesel erhoben wird, zu dem Strompreis addiert wird.

Somit folgt einer anfänglichen Elektro-Euphorie Phase nun die Ernüchterung. Kunden sehen in absehbarer Zeit keine Änderungen der Reichweitenproblematik und der hohen Kosten. Dazu sind viele Detailprobleme noch immer nicht gelöst. Es ist daher wichtig, dass Industrie, Forschung und Politik gemeinschaftliche Lösungen in Bezug auf Technologie, Verfahren, Standardisierung und Finanzierung erarbeiten. Ein Umdenken von großen, leistungsstarken Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor hin zu kleinen, energiesparenden Elektrofahrzeugen ist immer noch nicht erfolgt. Um die Kunden dennoch von der Elektromobilität zu überzeugen, sind verschiedene Ladestrategien, Geschäftsmodelle und Anreizmaßnahmen zu entwickeln.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Faktoren für eine Akzeptanz der Elektromobilität aus Kundensicht zu identifizieren. Darüber hinaus sollen Vorschläge für deren Einsatz aufgezeigt werden.

Die Analyse erfolgt deshalb aus den zwei Sichtweisen Technologieakzeptanz und Wirtschaftlichkeit. Verschiedene Ladetechnologien werden unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile erläutert, Geschäftsmodelle werden aufgezeigt und verschiedene Anreize für eine Akzeptanz aus Kundensicht vorgestellt. Diese Arbeit hinterfragt dabei kritisch, ob und wie die Elektromobilität von den potenziellen Kunden akzeptiert werden könnte.

Da die Kostenproblematik oft als größte Barriere für den Durchbruch der Elektromobilität gilt, wird im zweiten Teil der Arbeit eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Bei dieser Analyse sollen die Gesamtkosten von Elektrofahrzeugen mit denen konventioneller Fahrzeuge verglichen werden. Das Ziel der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist es, einen Überblick über sämtliche Kosten zu verschaffen und eine klare Aussage zu treffen, ab welchem Jahr Elektrofahrzeuge wirtschaftlicher sind und wie sich die Kosten bis zum Jahr 2050 entwickeln werden. Dazu sollen die Anschaffungskosten und sämtliche Betriebskosten in die Analyse einbezogen werden. Wenn möglich, werden zukünftige Kostenentwicklungen mit Prognosen belegt. Sind diese nicht gegeben, werden möglichst realitätsnahe Annahmen getroffen. Um realistische Aussagen zu erhalten, wird nicht mit „Durchschnittsfahrzeugen“, sondern mit realen und bereits auf dem Markt verfügbaren Fahrzeugen gerechnet.

Der Begriff Elektromobilität bezieht sich in dieser Arbeit auf Pkw im Straßenverkehr, die rein elektrisch angetrieben werden. Hybridfahrzeuge sind nicht Teil der Wirtschaftlichkeitsanalyse.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit soll zunächst einen Überblick über das Thema Elektromobilität geben und im weiteren Verlauf genauer in die Gebiete Technologieakzeptanz und Wirtschaftlichkeit einsteigen. Im 2. Kapitel wird daher zunächst die historische Entwicklung der Elektromobilität erläutert. Hier werden unter anderem die Faktoren genannt, die zunächst zu einem Durchbruch der Verbrennungsmotoren geführt haben. Des Weiteren wird kurz erläutert, warum die Elektromobilität heute wieder stärker in den Fokus gerückt ist.

Das 3. Kapitel vermittelt die Grundlagen der Elektromobilität. Als erstes wird der Begriff definiert, dann werden verschiedene Antriebstechniken von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, Elektro-Hybridfahrzeugen und wasserstoffbetriebenen Elektrofahrzeugen vorgestellt. Bei Elektro-Hybridfahrzeugen werden aufgrund der Technologievielfalt verschiedene Aufbauarten des Antriebsstranges erläutert. Aufgrund der aktuellen Diskussion über die Batterie-

technologien, wird ein Überblick über die am häufigsten verwendeten Batterietypen gegeben. Neben den technischen Eigenschaften werden auch Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten aufgezeigt. Der dritte Teil des dritten Kapitels geht letztendlich auf die Potenziale ein, die mit der Einführung der Elektromobilität verbunden sind. Diese Potenziale sind gleichzeitig der Auslöser, warum die Elektromobilität heutzutage aktueller denn je ist. Neben wirtschaftlichen Argumenten stehen in diesem Unterkapitel die Umweltfaktoren im Vordergrund.

Das 4. Kapitel beschäftigt sich mit der Technologieakzeptanz aus Kundensicht. Als erstes werden dafür zunächst die Barrieren aufgezeigt, die aktuell eine breite Ausdehnung der Elektromobilität verhindern. Im Anschluss daran werden Möglichkeiten gesucht, um in Zukunft eine Technologieakzeptanz aus Kundensicht zu generieren. Genauer werden dafür in diesem Kapitel verschiedene Ladetechnologien analysiert. Die Funktionsweise verschiedener Varianten wird vorgestellt und anhand von Vor- und Nachteilen verglichen. Ein wichtiger Faktor ist dabei die Berücksichtigung der Kundenanforderungen, ohne die eine Technologieakzeptanz nicht zu erreichen wäre. Entscheidend für die Nutzungsbereitschaft der Kunden ist auch die Wahl eines geeigneten Geschäftsmodells. Neben dem klassischen Fahrzeugkauf werden daher weitere Modelle kritisch analysiert und in Hinblick auf die Kundenakzeptanz bewertet. Um das Thema Technologieakzeptanz aus Kundensicht ganzheitlich zu betrachten, werden im weiteren Verlauf des vierten Kapitels diverse monetäre und nicht-monetäre Anreize vorgestellt, die potentielle Kunden überzeugen könnten Elektrofahrzeuge zu nutzen.

Der Empirische Teil dieser Arbeit folgt im 5. Kapitel. Dort wird die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen anhand einer Simulation verglichen. Zuvor werden jedoch die Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit, die auch in die Simulation einfließen, vorgestellt. Dies erfolgt ausführlich, um ein möglichst realistisches Simulationsergebnis zu erhalten. Danach werden die Grundannahmen des Modells und die Fahrzeugdaten der Vergleichsfahrzeuge vorgestellt. Mit einer anschließenden Erklärung des komplexen Excel-Simulationstools soll die Simulation für alle Leser verständlich gemacht werden. Ist dies geschehen, wird die Simulation für die Fahrzeugkategorien Kleinwagen, Mittelklassewagen und Sportwagen mit Jahreskilometerlaufleistungen von 10.000, 20.000 und 50.000 km durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Anschluss bewertet und kritisch hinterfragt. Schließlich endet das 5. Kapitel mit einer kurzen Auswertung einer Öko-Bilanz für Elektrofahrzeuge.

Die Kernaussagen der Arbeit werden letztendlich im 6. Kapitel zusammengefasst. Die Masterarbeit schließt mit einem Fazit ab.

Deutlich wird, dass elektrische Antriebe bei dem heutigen Kraftwerksmix bereits effizienter und umweltschonender sind als Verbrennungsmotoren.³⁷⁸ Erhebliche Klimavorteile werden jedoch erst bei einer Erzeugung des Stroms aus rein erneuerbaren Energiequellen erreicht.

6 Zusammenfassung und Fazit

Mit dieser Arbeit sollten zwei Ziele erreicht werden. Zum einen sollten die Faktoren, die die Akzeptanz der Elektromobilität aus Kundensicht beeinflussen, herausgearbeitet und analysiert werden. Zum anderen sollte mit einer Wirtschaftlichkeitsanalyse, anhand einer Simulation, gezeigt werden, welche Kosten pro Kilometer bei verschiedenen Elektrofahrzeugen anfallen und wie sich diese Kosten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen entwickeln. Einleitend wurde dafür zunächst im 2. Kapitel die Entwicklung der Elektromobilität vorgestellt. Es wurde gezeigt, dass der Durchbruch der Verbrennungsmotoren keinesfalls selbstverständlich war. Um 1900 konkurrierten Dampf-, Benzin-, und Elektrofahrzeuge um die beste Antriebstechnik. Schon früher galt der Elektroantrieb als komfortabel, jedoch verursachte, wie heute, die Reichweitenrestriktion die größten Probleme. Fahrzeuge mit Benzinmotor waren weniger komfortabel, setzten sich jedoch zunächst mit der Erfindung des Elektrostarters und mit beginnender Massenproduktion durch. Heutzutage ist das Thema Elektromobilität aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten wieder top aktuell.

Das 3. Kapitel beginnt mit einer Definition des Begriffes Elektromobilität. Danach wurden verschiedene Antriebstechniken vorgestellt. Batteriebetriebene Fahrzeuge weisen dabei besondere Vorteile auf. Sie sind sehr umweltverträglich, da sie keine lokalen Geräusch- und Schadstoffemissionen verursachen. Zu den weiteren Vorteilen zählen u. a. der hohe Wirkungsgrad, das schnelle Ansprechverhalten des Motors und die Rekuperation. Die größten Probleme verursacht dagegen die Batterie. Mit geringen Speicherdichten, langen Ladezeiten, sehr hohen Kosten und einer begrenzten Lebensdauer zählt sie zu den größten Nachteilen von Elektrofahrzeugen. Mit Elektro-Hybridfahrzeugen sollen die Vorteile von konventionellen Fahrzeugen mit denen von Elektrofahrzeugen kombiniert werden. Diese Fahrzeuge sind mit einem effizienten Verbrennungsmotor und mit einem Elektromotor ausgestattet. Für das Zusammenspiel dieser zwei Motoren gibt es zahlreiche Varianten. So dient der Elektromotor beim Mikro-Hybrid ausschließlich zum Starten des Verbrennungsmotors. Beim Mild-Hybrid wird zusätzlich der Beschleunigungsvorgang unterstützt. Dagegen ist beim Voll-Hybrid zusätzlich rein elektrisches Fahren möglich. Hybridantriebe werden in dem Kapitel zusätzlich

³⁷⁸ Vgl. hierzu und zum Folgenden Die Bundesregierung (2009), S. 8.

nach der Funktionsweise differenziert. Bei wasserstoffbetriebenen Elektrofahrzeugen wird die elektrische Energie mit Hilfe von Brennstoffzellen direkt im Fahrzeug erzeugt. Die Energie entsteht durch die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff. Als Nebenprodukt entsteht reines Wasser. Neben der Schadstofffreiheit sind die kurzen Tankzeiten von Wasserstoff und die hohe Kilometerreichweite die größten Vorteile. Problematisch ist jedoch die zurzeit noch mit hohen Schadstoffemissionen verbundene Herstellung von Wasserstoff. Ein ausgebautes Tankstellennetz ist zudem keinesfalls vorhanden.

Die größten Probleme der Elektromobilität verursacht die Batterie. Sie ist das größte und teuerste Bauteil eines Elektroautos. Diese Batterien ermöglichen oft nur sehr geringe Reichweiten und sind zudem so schwer, dass sie ca. 30 % des Fahrzeuggewichtes ausmachen. Wie gut ein Energiespeicher für den Einsatz im Elektroauto geeignet ist, lässt sich anhand der Eigenschaften Sicherheit, Kosten, Energiedichte, Leistungsdichte, Zyklenbeständigkeit, Lebensdauer, Kapazität, Wirkungsgrad, Strombelastbarkeit und der Spannungswerte beurteilen. Blei-Akkumulatoren sind sehr schwer, haben eine niedrige Energiedichte und eine kurzen Lebensdauer. Aufgrund der geringen Kosten werden sie zurzeit trotzdem in kleinen Elektrofahrzeugen eingesetzt. NiMH Batterien sind sehr temperaturempfindlich. So entstehen Leistungseinbußen bei Temperaturen unter 0 °C. Bei hohen Temperaturen kommt es zudem zu einer Selbstentladung. Wird die Batterie überladen, kommt es außerdem zu einer erheblichen Reduktion der Lebensdauer. Die Vorteile dieses Batterietyps liegen in der hohen Zyklenfestigkeit und in dem nicht vorhandenen Memory-Effekt. NaNiCl-Batterien haben eine hohe Leistungs- und Energiedichte und können die gesamte gespeicherte Energie wieder zu 100 % abgeben. Die Lebensdauer ist mit 3.000 Zyklen sehr lang. Problematisch ist jedoch, dass die Batterie kontinuierlich auf Temperaturen von 300 °C gehalten werden muss um eine Nutzung zu gewährleisten. Am häufigsten werden derzeit daher Lithium-Ionen-Akkus verwendet. Diese Batterien sind aufgrund der hohen Energiedichte, der verhältnismäßig schnellen Lademöglichkeit und der hohen Leistungsdichte für Elektrofahrzeuge interessant. Neben einer geringen Selbstentladung weisen sie außerdem keinen Memory-Effekt auf. Verbesserungen sind dennoch im Hinblick auf Kosten, Energiedichte, Gewicht, zyklischer und kalendarischer Lebensdauer sowie der Ladegeschwindigkeit erforderlich. Insgesamt wird deutlich, dass es zurzeit keinen optimalen Batterietyp für Elektrofahrzeuge gibt. Hier ist in Zukunft zwar mit Weiterentwicklungen zu rechnen, doch ein notwendiger Quantensprung ist derzeit nicht in Sicht.

In Kapitel 3.3 wurden die Potenziale der Elektromobilität vorgestellt, die gleichzeitig auch Auslöser des aktuellen Elektromobilität-Hypes sind. Da der Verkehr 20 % der energiebedingten CO₂-Emissionen verursacht, bietet der Betrieb von Elektrofahrzeugen großes Potenzial um diese Emissionen zu vermeiden. Entscheidend ist jedoch dabei, wie klimafreundlich die Produktion des benötigten Stroms erfolgt. Die lokale Emissionsfreiheit bietet besonders in Ballungszentren große Vorteile. So verursachen Elektrofahrzeuge keine Abgasemissionen und keinen Lärm, was die Lebensqualität in Städten, die unter großen Abgasproblemen leiden, deutlich steigern kann. Um Elektrofahrzeuge mit Strom aus einer CO₂-freien Produktion zu beziehen, könnte das erneuerbare Energiepotenzial weiter ausgebaut werden. Gleichzeitig würde sich die Abhängigkeit von erdölexportierenden Ländern verringern. Dieser Schritt erscheint sinnvoll, unter Berücksichtigung, dass die Erdölvorkommen immer weiter abnehmen. Es sollte jedoch nicht völlig außer Acht gelassen werden, dass durch die Beschaffung von Lithium für Lithium-Ionen-Akkus neue Abhängigkeiten entstehen können. Weiteres Potenzial besteht in der Entwicklung Deutschlands zu einem Leitmarkt für Elektromobilität. Bereits heute sind Fahrzeuge deutscher Hersteller als innovativ, sicher und zuverlässig bekannt. In Zukunft besteht das Potenzial, auch im Bereich Elektromobilität eine Vorreiterrolle zu übernehmen. Dafür sind die Qualifizierung der Mitarbeiter und die Lösung des Fachkräftemangels zwingend erforderlich. Aber auch die Batterieforschung, die Forschung und Entwicklung von Komponenten und Systemen, die Produktion, der Vertrieb, Reparatur und Wartung sowie die Recyclingbranche sollten weiter unterstützt und vorangetrieben werden. Werden in Zukunft immer mehr Fahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen gespeist, steigt der Bedarf an Speichermöglichkeiten stark an. Diese Stromspeicher sind notwendig, weil Energieangebot und Energienachfrage oftmals zeitlich und lokal nicht übereinstimmen. Die Batterien der Elektrofahrzeuge bieten daher die Möglichkeit das Angebot und die Nachfrage auszugleichen. Bei einer bidirektionalen Betriebsweise kann der Strom nicht nur aus der Steckdose in die Fahrzeugbatterie geleitet werden, sondern auch wieder zurück. Erzeugungsspitzen lassen sich somit reduzieren und überschüssige Energie, bspw. aus Windkraftanlagen, kann zwischengespeichert werden. Dieses Modell wird von den Kunden nur akzeptiert, wenn die Batterien eine hohe Zyklenlebensdauer aufweisen oder wenn sich für sie, im Rahmen eines Batterieleasings, keine Nachteile ergeben. Möglich ist auch eine Vergütung der Fahrzeugbesitzer, wenn sie ihr Fahrzeug als Energiespeicher bereitstellen.

Im 4. Kapitel wurden die Barrieren für einen Durchbruch der Elektromobilität identifiziert. Die größten Barrieren sind dabei vergleichsweise hohen Anschaffungskosten und die geringe

Reichweite der Fahrzeuge. Obwohl die tägliche Fahrstrecke der meisten potenziellen Nutzer mit einer Batterieladung zu bewältigen wäre, schreckt diese Einschränkung die Kunden von dem Kauf ab. Weitere Barrieren sind die nicht ausreichend entwickelte Ladeinfrastruktur, die Technologieunsicherheit der Kunden und möglicherweise begrenzte Anreize der Automobilhersteller in neue Produktionsanlagen zu investieren. Eine weitere Barriere stellt die unzureichende Information aller beteiligten Akteure dar.

Die Preise der Fahrzeuge werden sich möglicherweise nur im Laufe der Zeit über Skaleneffekte reduzieren und eine Erhöhung der Reichweite kann nur über einen Quantensprung in der Batterieforschung erreicht werden. Dagegen ist eine Gestaltung der Ladeinfrastruktur aktiv möglich. Zu unterscheiden sind dabei das kabelgebundene Laden, das kabellose Laden, der Batteriewechsel und die Betankung mit Wasserstoff. Am gängigsten ist die kabelgebundene Variante. Bei einer Verwendung der Haushaltssteckdose ist die Ladedauer jedoch sehr lang. Eine Alternative bieten Schnelladesysteme, die voraussichtlich bei Firmen oder an Autobahnen errichtet werden. Setzen sich Schnelladesysteme durch, kann dies wiederum zu einer Überlastung der Netze führen. Das Ladeverfahren stellt zudem immer einen Kompromiss zwischen technischem Aufwand, erforderlicher Ladedauer und Lebensdauer der Batterie dar. Bei der Versorgung der Fahrzeuge mit Strom, kann die Abnahme des Stroms entweder mit oder ohne Einfluss des Stromanbieters erfolgen. Um die verschiedensten Ladeverfahren für alle Elektroautos zugänglich zu machen ist eine weltweite, einheitliche Steckernorm zu entwickeln. Nur so kann Unsicherheit bei den Kunden reduziert werden, was letztendlich wieder zu einer Technologieakzeptanz führt. Eine Reduzierung der Reichweitenangst ist neben verbesserten Batterien nur durch eine dicht ausgebaute Ladeinfrastruktur möglich. Die Ladung der Fahrzeuge sollte dabei für den Kunden sicher sein, so dass es zu keinem Kontakt mit dem Strom kommt. Eine komfortable Lösung bietet das kabellose Laden. Der Ladevorgang könnte statisch oder dynamisch erfolgen. Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen wird sich diese Technologie jedoch vorerst nicht durchsetzen. Eine andere Alternative sind Batteriewechselstationen, die einen schnellen Austausch der leeren Batterie gegen eine volle Batterie ermöglichen. Dieses Systems funktioniert jedoch nur bei einem flächendeckenden Ausbau und der Normung der Batterien aller Hersteller. Diese Entwicklung ist derzeit nicht absehbar. Das Wasserstofftankstellennetz müsste ebenfalls stark ausgebaut werden, was zu sehr hohen Investitionen führen würde.

Um eine schnelle Markteinführung zu erreichen und das Problem der hohen Anschaffungskosten zu umgehen, bieten verschiedene Geschäftsmodelle eine Lösungsmöglichkeit. Der Fahrzeugkauf ist das am weitesten verbreitete Geschäftsmodell bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Elektrofahrzeuge sind jedoch erheblich teurer und ein Kauf würde sich nur wirtschaftlich lohnen, wenn die Betriebskosten deutlich geringer sind, als die von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten sind ebenfalls die Leasingraten höher als bei konventionellen Fahrzeugen. Um Reichweitenrestriktionen zu vermeiden, bietet sich ein kombiniertes Leasingmodell an, bei dem der Leasingnehmer ständig zwischen Fahrzeugen mit Elektroantrieb und Verbrennungsmotor wechseln kann. Beim Batterieleasing ist dagegen nur die Batterie Gegenstand des Leasingvertrages. Somit wird das Risiko einer vorzeitig verschleißenden, teuren oder kaputten Batterie auf den Hersteller übertragen. Dadurch kann die Akzeptanz bei Kunden erhöht und der Fahrzeugpreis reduziert werden. Für Kunden wird dieses Modell aber nur interessant, wenn die Kraftstoffkosten über der Summe aus Leasingraten und Stromkosten liegen. Ein weiteres Geschäftsmodell ist das Car-Sharing. Kunden können dabei Fahrzeuge stunden- oder tageweise buchen. Da eine Person ein Fahrzeug im Schnitt nur eine Stunde pro Tag nutzt, könnten so die Fahrzeugkosten auf mehrere Nutzer verteilt werden. Zudem werden so Energie und Rohstoffe eingespart. Ein spezielles Geschäftsmodell bietet das Unternehmen Better Place an. Beim Kauf eines Elektrofahrzeuges bleibt der Akku im Besitz von Better Place. Der Kunde zahlt nur für die Kilometer, die er tatsächlich zurückgelegt hat. Die Akkus werden entweder mit Strom von Better Place geladen oder in entsprechenden Akkuwechselstationen getauscht. Dieses Modell kann sich voraussichtlich nur durchsetzen, wenn die Preise pro Kilometer unter den Energiekosten für konventionelle Fahrzeuge liegen.

Um neben einer geeigneten Ladeinfrastruktur und verschiedenen Geschäftsmodellen Technologieakzeptanz zu erreichen, sind zusätzlich monetäre und nicht-monetäre Anreize notwendig. Eine Möglichkeit bieten ordnungspolitische Maßnahmen, die Nutzer von Elektrofahrzeugen gegenüber Nutzern konventioneller Fahrzeuge bevorzugen. Dies könnte durch Verschärfung der Abgasnormen, die Freigabe von Taxi- und Busspuren oder das Vorhalten von Parkplätzen für Elektrofahrzeuge erreicht werden. Die Schaffung dieser Vorteile sollte jedoch immer individuell geprüft werden. Bei monetären Anreizen sind Verbesserungen bei der Besteuerung von Elektrofahrzeugen als Dienstwagen zu erwarten. Aber auch private Nutzer sind für fünf Jahre bei einer Neuanschaffung von der Kfz-Steuer befreit. Eine Subventionierung von Elektrofahrzeugen könnte für zusätzliche Kaufanreize sorgen. Aber auch zinsgünstige Kredite,

speziell für Elektroautos, können das Kaufinteresse steigern. Ein indirekter Kaufimpuls für Elektrofahrzeuge wäre dagegen die drastische Erhöhung der Benzin und Diesel Preise.

Die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen wurde schließlich im 5. Kapitel untersucht. Dabei wurden alle anfallenden Kosten ermittelt und mit denen konventioneller Fahrzeuge verglichen. Als ökonomische Einflussgrößen wurden Kreditkosten, kalkulatorische Zinsen und Versicherungskosten ermittelt. Die Kreditkosten für Elektrofahrzeuge waren aufgrund besonderer „Öko-Kredite“ kostengünstiger als für konventionelle Fahrzeuge. Die Betriebskosten der Fahrzeuge werden zusätzlich durch technisch-ökonomische Einflussgrößen beeinflusst. Dazu zählen Nutzungsdauer, Wertminderung, Entwicklung zukünftiger Fahrzeugpreise, Batteriekosten, spezifische Kraftstoffverbräuche, Pflegekosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie Entsorgungskosten. Großen Einfluss auf die Gesamtkosten in der Simulation haben die Batteriekosten und die Entwicklung zukünftiger Fahrzeugpreise. Es handelt sich um zwei große Kostenfaktoren, die die Simulation entscheidend beeinflusst haben. Aus politisch-ökonomischer Sicht wurden Steuern sowie die Entwicklung der Kraftstoff- und Strompreise berücksichtigt. Von Vorteil ist die fünfjährige Steuerbefreiung für Elektrofahrzeuge. Nachteilig ist jedoch, dass zu dem Strompreis in naher Zukunft ein Mineralölsteuersubstitut addiert werden könnte, was die Betriebskosten deutlich ansteigen lassen würde. Nach einer Definition der Annahmen und einer Erklärung des Excel Simulationstools wurde schließlich die Simulation durchgeführt und ausgewertet. Insgesamt wurde deutlich, dass häufig bereits ab der zweiten Fahrzeuganschaffung ein Elektrofahrzeug, aus wirtschaftlicher Sicht, kostengünstiger ist als das Vergleichsfahrzeug. Dieses Ergebnis resultiert hauptsächlich aus der Entwicklung der Fahrzeugpreise. Da für Fahrzeuge mit Benzin- und Dieselmotor weiter steigende Preise und für Elektrofahrzeuge weiter sinkende Preise prognostiziert wurden, sind Elektrofahrzeuge in naher Zukunft in der Anschaffung günstiger. Da es sich um den größten Kostenfaktor in der Simulation handelt, hat diese Entwicklung entsprechend hohe Auswirkungen. Aus Sicht der Betriebskosten wird die Kostendifferenz zwischen Elektrofahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen in Zukunft immer größer werden. Selbst die Einführung eines Mineralölsteuersubstituts kann nicht verhindern, dass Elektrofahrzeuge deutlich geringere Betriebskosten aufweisen werden. Nachdem die ökonomische Sicht behandelt worden ist, wurde im letzten Kapitel ein Überblick über die Öko-Bilanz von Elektrofahrzeugen gegeben. Je nach Energieerzeugungsart ergeben sich unterschiedliche Wirkungsgrade und CO₂-Emissionen. Elektrofahrzeuge sind zwar lokal emissionsfrei, bei einer Herstellung des Stroms aus Braunkohle verursachen sie jedoch höhere Emissionen als Fahrzeuge mit Ver-

brennungsmotor. Daher sollte immer die Gesamtkette der Energiewandlung betrachtet werden.

Ziel dieser Arbeit war es, die Faktoren für die Akzeptanz der Elektromobilität aus Kundensicht zu identifizieren und Vorschläge für deren Gestaltung zu machen. Mit der Wirtschaftlichkeitsanalyse sollte Klarheit über die tatsächlichen Kosten von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen geschaffen werden. Deutlich wurde, dass Kraftanstrengungen aller beteiligten Akteure, wie Staat, Energieversorgern oder Automobilherstellern notwendig sind, um der Elektromobilität zum Durchbruch zu verhelfen. Voraussichtlich werden sich Kunden in Zukunft darauf einstellen, andere Geschäftsmodelle wie den Fahrzeugkauf zu wählen. Nur durch ein Umdenken der Konsumenten oder durch eine drastische Erhöhung der Reichweite sowie einer Verringerung der Kosten kann die Elektromobilität aus der Nische erfolgreich am Markt positioniert werden. Da ein Quantensprung aus technischer Sicht nicht absehbar ist, bieten Geschäftsmodelle wie das Car Sharing eine gute Alternative. In Zukunft wird es schließlich selbstverständlich werden, nach dem Einparken des Fahrzeuges eine Ladestation zur Ladung des Fahrzeuges zu suchen. Dieser Vorgang wird umso stärker akzeptiert, umso einfacher, schneller und sicherer der Ladevorgang ist. Für den Kunden ist es außerdem von Vorteil, wenn der Batterieverschleiß in der Verantwortung des Herstellers bleibt und er im Rahmen eines Leasingvertrages nur für eine geringe Leasinggebühr und die Stromkosten aufkommen muss. Weitere monetäre und nicht monetäre Anreize werden von den Konsumenten positiv wahrgenommen, aber bspw. die Mitbenutzung der Busspur wird alleine keinen Kaufanreiz generieren. Im Fokus stehen weiterhin die Anschaffungskosten und die Reichweitenproblematik. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde unter den gemachten Annahmen deutlich, dass Elektrofahrzeuge schon in naher Zukunft kostengünstiger sein können. Ob potenzielle Kunden trotz Kostenvorteilen, Anreizmaßnahmen und Umweltgesichtspunkten Komfortverluste durch kurze Reichweiten und lange Ladevorgänge in Kauf nehmen werden, wird sich in Zukunft zeigen.