



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Institut für Wirtschaft und Verkehr • Professur für Ökonometrie und Statistik, insbesondere im Verkehrswesen

Bachelorarbeit

zum Thema

Sind E-Autos alltagstauglich oder werden sie dies in der Zukunft sein?

vorgelegt von: Bich Lien Nguyen

Matrikel-Nr.: 3989108

Studiengang: Verkehrswirtschaft

Verantwortlicher

Hochschullehrer: Prof. Dr. Ostap Okhrin

Betreuer: Dr. rer. nat. Martin Treiber

Dresden, den 20.02.2018



Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1	EINLEITUNG	1
KAPITEL 2	ÜBERBLICK ELEKTROAUTOS	3
2.1	BEGRIFFSERKLÄRUNG: ELEKTROAUTO	3
2.2	BESTANDTEILE DER ELEKTROANTRIEBE	4
2.3	ÖKOLOGISCHER ASPEKT	5
2.4	UNTERSCHIEDE ZU KONVENTIONELLEN FAHRZEUGEN.....	9
KAPITEL 3	ANALYSE DER REICHWEITENABHÄNGIGKEIT	12
3.1	EINFLUSSFAKTOREN	12
3.2	MODELLERSTELLUNG	13
3.2.1	<i>(Außen-)Temperatur</i>	14
3.2.2	<i>Geschwindigkeit</i>	18
3.3	MODELLZUSAMMENFÜHRUNG	22
KAPITEL 4	AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE	23
4.1	FAHRTEN INNERHALB GESCHLOSSENER ORTSCHAFTEN	24
4.2	FAHRTEN AUßERHALB GESCHLOSSENER ORTSCHAFTEN	25
4.3	AUTOBAHN	27
4.4	SCHLUSSFOLGERUNG.....	28
KAPITEL 5	ENERGIEEFFIZIENTE KLIMATISIERUNG VON ELEKTROAUTOS	30
KAPITEL 6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	33



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestandteile des Elektroantriebes.....	4
Abbildung 2: CO ₂ -Emissionen von Fahrzeugen mit unterschiedlichem Antrieb.....	8
Abbildung 3: Grafische Darstellung der ermittelten Reichweitenwerte in Abhängigkeit von der Temperatur	16
Abbildung 4: Grafische Darstellung der Reichweitenwerte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit am Beispiel des Renault Zoe	22
Abbildung 5: Reichweitenwerte eines Renault Zoe und eines Smart Fortwo ED in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h .	24
Abbildung 6: Reichweitenwerte eines Renault Zoe und eines Opel Ampera-e in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 100 km/h	26
Abbildung 7: Reichweitenwerte eines Opel Ampera-e in Abhängigkeit von der Temperatur mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 130 km/h	27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Reichweitenwerte zu bestimmten Umgebungstemperaturen im Jahr 2012	15
--	----



Symbole

Symbole des lateinischen Alphabets:

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	m ²	Stirnfläche des Fahrzeugs
c _w		Luftwiderstandsbeiwert
F	1N=1(kg*m)/s ²	Fahrwiderstand
F _L	N	Luftwiderstand
F _R	N	Reibungskraft
F _S	N	Hangabtriebskraft
F _T	N	Trägheitskraft
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
m	kg	Masse des Fahrzeugs
P ₀	W	Grundleistung
P	W	Elektrische Leistung
t	s	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit
\dot{v} , a	m/s ²	Beschleunigung
x	°C	(Außen-)Temperatur
y=ln(z)	km	Reichweite



Symbole des griechischen Alphabets:

Symbol	Einheit	Beschreibung
α		Steigung der Straße
μ		Reibungskoeffizient
ρ	kg/m ³	Dichte der Luft

Abkürzungsverzeichnis

BMJV	Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COP	Coefficient of Performance
EmoG	Elektromobilitätsgesetz
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
PKW	Personenkraftwagen
ZEV	Zero Emission Vehicle



Kapitel 1 Einleitung

„Die Mobilität, wie wir sie heute praktizieren, ist nicht zukunftsfähig.“ (Kiermasch 2013: 11). Diese Erkenntnis von dem damaligen Bundespräsidenten Horst Köhler bei der ADAC Preisverleihung Gelber Engel im Jahr 2010 lässt die Frage schlussfolgern: Wie soll die Mobilität in Zukunft aussehen?

Die Luftverschmutzung sorgt für den anthropogenen Treibhauseffekt. Dieser führt zu Klimaveränderungen. Neben den daraus resultierenden Umweltschäden schließen sich auch Gesundheitsschäden aus der Luftverschmutzung an. Werden die Treibhausgasemissionen in Deutschland betrachtet, so verursacht der Verkehrssektor nach der Energiewirtschaft die meisten CO₂-Abgase (vgl. Statista 2017a). Darüber hinaus sind die vom Verkehr verursachten Emissionen seit 1990 angestiegen (vgl. Öko-Institut e.V. 2017: 2).

Die Maßnahmen zur Verringerung der Emissionen im Verkehrsbereich sind mit hohem Aufwand verbunden. Dazu zählen die Reduktion des Verkehrsaufkommens und des Kraftstoffverbrauchs (vgl. Kukuck 1996: 35). Aufgrund der steigenden Bevölkerungszahl ist jedoch ersteres kaum möglich. Daher bietet die Entwicklung eines alternativen Antriebskonzeptes eine erwägenswerte Lösung zur Verringerung der Treibhausgase. Denn Hauptverursacher für die Luftverschmutzung im Verkehrssektor sind die Benzin- und Dieselfahrzeuge. Da vor allem stark besiedelte Gebiete wie Großstädte besonders von der Verschmutzung betroffen sind, können Elektroautos diesem Problem entgegenwirken. Laut der Bundesregierung sollen bis 2020 mindestens eine Million Elektroautos in Deutschland geben (vgl. BMWi). Dies soll unterstützt werden durch beispielsweise staatliche Förderung des Umstiegs von konventionellen Fahrzeugen zu elektrisch betriebenen Fahrzeugen. Denn von insgesamt 45 Millionen PKWs sind jedoch nur etwa 34.000 elektrisch betriebene Fahrzeuge (vgl. Statista 2017b).

Nun stellt sich die Frage, ob Elektroautos ein möglicher Ersatz zu konventionellen Fahrzeugen darstellen. Die Hauptproblematik ist die geringe Reichweite, die nicht nur von der Akkukapazität beeinflusst wird, sondern auch von der Umgebungstemperatur und der



Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Zusammen mit der Problematik der unzureichenden Ladeinfrastruktur führt dies zu einer nur schleppenden Umstellung auf Elektroautos.

Ziel dieser Arbeit ist die Modellerstellung der Reichweite in Abhängigkeit zur Temperatur und Geschwindigkeit. So können Aussagen über die Alltagstauglichkeit des Elektrofahrzeugs sowohl im Winter als auch im Sommer getroffen werden.



Kapitel 2 Überblick Elektroautos

2.1 Begriffserklärung: Elektroauto

„Elektromobilität ist der Personen- und Güterverkehr mittels Fahrzeugen, die mit elektrischer Energie angetrieben werden.“ (Karle 2017: 15). Hierbei gelten Fahrzeuge als Elektrofahrzeuge, wenn sie mithilfe von einem oder mehreren Elektromotoren durch elektrische Energie angetrieben werden. Umgesetzt wird dies bereits in Form von Elektroautos, Elektrofahräder oder Elektrostraßenbahnen.

Laut dem vom Bundestag beschlossenen Elektromobilitätsgesetz (EmoG), welches 2015 in Kraft getreten ist, gehören rein elektrisch betriebene Fahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge als auch Hybridfahrzeuge mit Elektromotoren zur Kategorie der elektrisch betriebenen Fahrzeuge (vgl. BMJV 2015: 1).

Dabei ist ein reines Elektrofahrzeug: „ein Kraftfahrzeug mit einem Antrieb, dessen Energiewandler ausschließlich elektrische Maschinen sind und dessen Energiespeicher zumindest von außerhalb des Fahrzeuges wieder aufladbar sind“ (BMJV 2015: 1).

Brennstoffzellenfahrzeuge werden ebenfalls elektrisch betrieben. Der Hauptunterschied zu anderen Fahrzeugtypen ist, dass er in der Lage ist, chemische Energie eines gespeicherten Brennstoffes mittels einer Brennstoffzelle direkt in elektrische Energie umzuwandeln (vgl. Karle 2017: 38). Detaillierter betrachtet, wird zur Energiespeicherung Wasserstoff benötigt, welcher zusammen mit Sauerstoff in einer Brennstoffzelle zu Wasser reagiert. In diesem Prozess entsteht die elektrische Energie. Diese Energie kann direkt an dem Elektromotor abgegeben werden (vgl. Jung 2014: 25).

Da der Nutzung eines Elektroautos noch immer viele Hürden entgegenstehen, erfolgte die Spezialisierung vieler Automobilhersteller auf die Produktion von Hybridfahrzeugen. Der große Unterschied zum rein elektrisch betriebenen Fahrzeug liegt darin, dass Hybridfahrzeuge aus verschiedenen Motoren bestehen (vgl. Karle 2017: 31). Die Stromversorgung erfolgt teilweise auch über den Verbrennungsmotor. Beispielsweise werden bei Plug-In



Hybriden für kurze Strecken der Elektromotor verwendet. Bei längeren Fahrten kommt jedoch der Verbrennungsmotor zum Einsatz.

In meiner Arbeit möchte ich den Fokus auf nur rein elektrisch betriebene Fahrzeuge legen.

2.2 Bestandteile der Elektroantriebe

Optisch gesehen unterscheiden sich elektrisch betriebene Fahrzeuge kaum von herkömmlichen Fahrzeugen. Dabei ist der Aufbau des Antriebssystems komplett unterschiedlich. Das Antriebssystem eines Elektroautos besteht aus dem Elektromotor, dem Akkumulator und der Leistungselektronik. In Abbildung 1 wird der grobe Aufbau eines Elektroautos am Beispiel des Citroën C-Zeros dargestellt.



Abbildung 1: Bestandteile des Elektroantriebes (Quelle: Joest 2010)

Elektromotor

Allgemein ist ein Elektromotor ein Motor, der elektrische Energie in mechanische Energie umwandelt. Für die Verwendung bei Elektroautos müssen Elektromotoren bestimmte Anforderungen erfüllen. Für eine effektive Nutzung sollen Elektromotoren einen hohen Wirkungsgrad aufweisen können (vgl. Karle 2017: 61). Der Wirkungsgrad eines Elektromotors kann unter anderem durch den Vorgang der Rekuperation mehr als 90% betragen (vgl.



Karle 2017: 21). Rekuperation bedeutet Bremsenenergieerückgewinnung, wodurch mechanische Energie zur weiteren Nutzung wieder in die Batterie gespeichert wird (vgl. Karle 2017: 21). Denn jede freiwerdende Energie soll möglichst ausgenutzt werden.

Akkumulator

In Akkumulatoren befinden sich galvanische Zellen, die die chemisch gespeicherte Energie in elektrische Energie umgewandelt (vgl. Karle 2017: 76). Dafür sind Nickel-Metallhydrid-Akku, Natrium-Nickelchlorid-Batterie und Lithium-Ionen-Akku mögliche Akkumulatoren für Elektrofahrzeuge (vgl. Karle 2017: 78).

Da der Lithium-Ionen-Akku bereits aus der Verwendung bei Laptops und Handys Vorteile brachte, wird auch er hauptsächlich bei Elektroautos verwendet (vgl. Karle 2017: 79). Aus den möglichen Akkus kann bei diesem die höchste Kapazität erreicht werden. Sie haben verglichen mit anderen Akkus die höchste Leistungs- und Energiedichte. Außerdem haben sie einen hohen Wirkungsgrad durch ihren geringen Innenwiderstand (vgl. Karle 2017: 79).

Leistungselektronik, Inverter

Akkumulatoren liefern Gleichstrom, doch für die Motoren werden Wechsel- bzw. Drehstrom benötigt, somit erfolgt diese Umsetzung mit Hilfe der benötigten Leistungselektronik, dem Inverter (vgl. Karle 2017: 89). Der Inverter bildet die Bindung zwischen dem Akku und dem Elektromotor. Eine weitere wichtige Aufgabe des Inverters ist, dass er bei Rekuperation die Energieerückgewinnung steuert (vgl. Karle 2017: 89).

2.3 Ökologischer Aspekt

Die jährlich stattfindenden Klimakonferenzen wie in Bonn 2017 und in Paris 2016 zeigen die Problematik des Klimawandels auf. Es werden Klimadebatten geführt und abgesehen von einigen Ausnahmen werden zurzeit große Anstrengungen um beschlossene Klimaziele zu erreichen. Die Klimadebatte wird von der Politik ernst genommen und es werden länderübergreifende Klimaziele gesetzt, um den Klimawandel einzudämmen. Maßnahmen hierfür sind unter anderem beschlossene Protokolle wie das Kyoto-Protokoll 1997 mit dem Ziel des Klimaschutzes. Denn der von Menschen verursachte Klimawandel zieht einige negative



Auswirkungen für die Erde und somit der Weltbevölkerung mit sich, dessen volle Ausmaße noch nicht bekannt sind und so die möglichen, schrecklichen Zukunftsszenarien noch nicht offensichtlich sind. Doch schon jetzt ist die globale Erderwärmung überall bemerkbar und die Ursache für Smog und die damit verbundene Verschlechterung der Lebensqualität in Städten. Hauptverursacher dafür sind die hohen Treibhausgasemissionen der Industrieländer. Diese sind auch Anlass für die Weltgemeinschaft, Anstrengungen zu unternehmen, um den Treibhausgasausstoß einzudämmen. Hierzu wird in den Klimakonferenzen eine Klimapolitik erarbeitet, bei der eine Reduzierung der Emissionen angestrebt wird. Insbesondere Europa hat sich das Ziel gesetzt, bis 2050 die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 um mindestens 80% zu reduzieren (vgl. BMUB).

Bei der Untersuchung von Treibhausgasemissionen, fallen verstärkt Energiewirtschaft, Verkehr, Gewerbe und private Haushalte als Bereiche in den Blickpunkt. In der Energiewirtschaft beispielweise wurden im Jahr 2015 etwa 335 Millionen Tonnen Kohlendioxidäquivalente ausgestoßen (vgl. Statista 2017a). Problematisch hierbei ist, dass die hohen Emissionen aufgrund der aktuell noch hochfrequentierten Nutzung von Kohle-, Gas- und Atomkraftwerken weiterbestehen. Als langfristige und zukunftsorientierte Lösung soll die erneuerbare Energie diese Problematik lösen, denn bei der Erzeugung und Gewinnung von Wind-, Wasser- und Solarenergie werden keine Emissionen an die Atmosphäre abgegeben.

Wird der Verkehrssektor betrachtet, so sind die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren die Hauptverursacher der Luftverschmutzung. Die Bundesregierung möchte den Umstieg demgemäß fördern und erwartet bis 2020 mindestens eine Million Elektrofahrzeuge auf den Straßen Deutschlands (vgl. BMWi). Im Jahr 2015 entstanden etwa 161 Millionen Tonnen von insgesamt 335 Millionen Tonnen Kohlendioxidäquivalent (vgl. Statista 2017a). Hauptsächlich Grund dafür sind die Diesel- und Benzinmotoren. Außerdem besteht das Problem der Ölabhängigkeit, denn Erdöl ist ein natürlicher Rohstoff mit begrenztem Vorkommen. Um diese Probleme reduzieren zu können, kann die Umstellung von konventionellen Fahrzeugen auf Elektroautos als ein effektiver und dauerhafter Lösungsvorschlag gesehen werden.

Bekanntermaßen wird das Elektroauto als Null-Emissionen-Auto (ZEV) eingestuft, da es lokal emissionsfrei ist (vgl. Karle 2015: 23). Doch global gesehen, hängt die



Emissionsfreiheit von der Stromerzeugung ab. Dazu müssen die einzelnen Phasen im „Lebenszyklus“ eines Elektroautos detaillierter betrachtet werden.

Herstellung

Wie bei einem herkömmlichen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor werden ebenfalls beim Elektrofahrzeug zahlreiche Rohstoffe benötigt. Da vor allem der Leichtbau wegen Gewichtsreduzierung eines Elektroautos angestrebt wird, wird auf das Gewicht der zu verwendeten Materialien besonderer Wert gelegt. Demzufolge werden bei der Herstellung große Mengen an Aluminium, Kunststoff und Kupfer genutzt (vgl. Schoblick 2013: 87). Für die Herstellung der Akkumulatoren wird Lithium benötigt. Dabei ist die Gewinnung sehr umweltbelastend beispielsweise können hierdurch ganze Salzseen zerstört werden (vgl. Jungblut 2017). Auch mit der Herstellung von Elektrofahrzeugen wird das Problem mit der Rohstoffknappheit nicht deutlich behoben. Des Weiteren entstehen bei der Herstellung CO₂-Mengen. Dabei hängt es besonders davon ab, wie umweltfreundlich die Energiewirtschaft ist.

Betrieb

Wie bereits erwähnt werden Elektroautos den ZEV aufgrund ihrer lokalen Emissionsfreiheit untergeordnet. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass diese Zuordnung von der Art der Stromerzeugung abhängt. Erfolgt die Stromerzeugung nur mithilfe von Kohlekraftwerken, so ist das Fahren eines E-Autos kaum umweltfreundlicher als ein herkömmliches Auto. In Deutschland gibt es durch die Energiewende einen Strommix mit einer steigenden Tendenz für regenerativer Energieträger.

Zum Vergleich wurden die globalen CO₂-Emissionen eines Benzin-, Diesel- und Elektrofahrzeugs bei einer Lebensleistung von etwa 150.000 km ermittelt. Für ein Benzinauto betragen die Emissionen etwa 250 g CO₂-Äquivalente pro km. Beim Dieselfahrzeug sind es etwa 210 g CO₂-Äquivalente pro km. Und umgerechnet auf das Elektroauto sind es 220 g CO₂-Äquivalente pro 100 km. Diese Werte wurden aus Scrosati et al. (2015: 27) entnommen. Dabei werden die abgegebenen Emissionen bei der Herstellung, beim Betrieb als auch bei der Instandhaltung bis zu ihrem Lebensende berücksichtigt. Des Weiteren muss hierbei beachtet werden, dass die Werte vom Jahr 2015 stammen, sodass bis jetzt der Strommix in Deutschland sich verbessert hat.

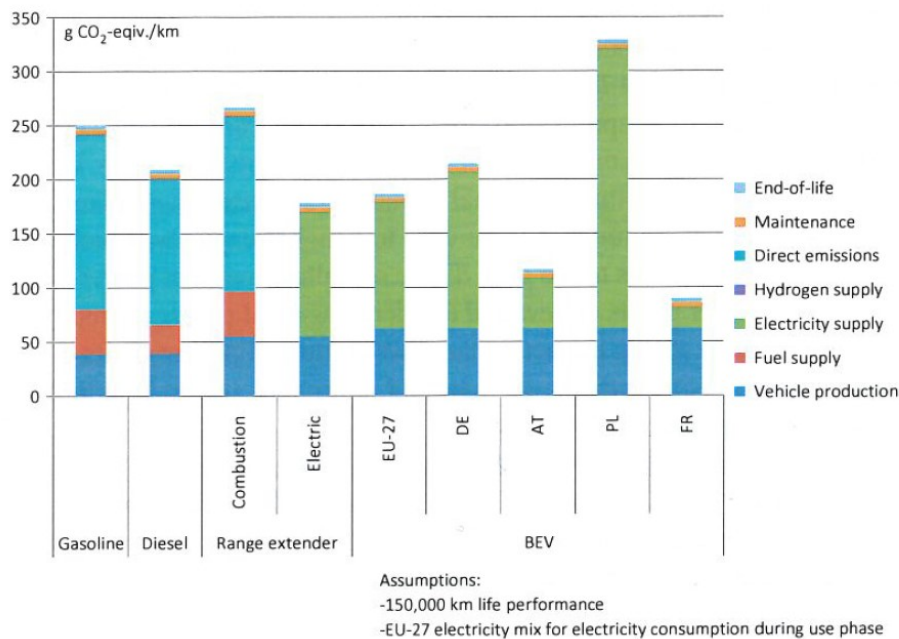


Abbildung 2: CO₂-Emissionen von Fahrzeugen mit unterschiedlichem Antrieb (Quelle: Scrosati 2015: 27)

Anhand dieser Daten ist zu erkennen, dass mit dem Umstieg zum Elektroauto eine Grundlage zur Reduktion der Abgase vorhanden ist. Wird jedoch der Strom nur anhand von Kohlekraftwerken erstellt, so würde dies keine große Maßnahme bzw. Verbesserung für die Umwelt führen. Bei einem Strommix wie in Deutschland lassen sich deutliche Reduzierungen nachweisen. Theoretisch ist es sogar möglich, den Ausstoß von Abgasen auf null zu beschränken. Sauberer Strom kann mithilfe von erneuerbaren Energie erzeugt werden. Erst dann sind Elektroautos sowohl lokal als auch global vollständig emissionsfrei. Folglich kann ausgesagt werden, dass je höher der Anteil der erneuerbaren Energie in der Stromerzeugung ist, desto mehr Klimavorteile bringt das Elektroauto (vgl. Öko-Institut e.V. 2017: 4). Deswegen lohnt sich der Betrieb von Elektroautos auch nur dann, wenn der Anteil an erneuerbarer Energie im Land den Großteil der Energiewirtschaft bildet. Zum Vergleich können die Werte aus der Abbildung 2 von Polen mit Deutschland betrachtet werden. Es ist zu sehen, dass in Polen die Energieerzeugung mit etwa 250 Gramm CO₂-Äquivalente pro km umweltbelastender ist als die von Deutschland mit nur 150 Gramm CO₂-Äquivalente.



Ein weiterer Vorteil, der durch den Umstieg zu Elektroautos gegeben wird, ist die reduzierte Nutzung vom fossilen Kraftstoffverbrauch im Verkehr. Somit reduziert sich die Erdölabhängigkeit mit steigendem Stromverbrauch.

Entsorgung

Da noch nicht genügend Erfahrungen mit Lithium-Ionen-Akkus gemacht wurden, wird ihre Lebensdauer auf 5-8 Jahre geschätzt und ihre Kilometergrenze liegt bei 100.000-160.000 km (vgl. Karle 2017: 82). Zudem kommt hinzu, dass ihre Leistungsfähigkeit von Jahr zu Jahr auch bei Nichtbenutzung verringert. Liegt die Akkukapazität unter 80% ist sie für Elektroautos nicht mehr nutzbar und muss ausgewechselt werden (vgl. Karle 2015: 80). Aber mit der übrigen Leistungskapazität kann die Batterie weiterhin effizient in anderen Bereichen verwendet werden, deswegen wird dabei vom „Second Life“ gesprochen (vgl. Jungblut 2017). Aufgrund ihrer weiterhin hohen Speicherkapazität können mehrere Batterien zusammengeschlossen werden und dienen somit als Zwischenspeicher für regenerative Energien, welche später an das Stromnetz abgegeben werden können (vgl. Specht 2016).

Beim Recycling-Verfahren von Lithium-Ionen-Batterien werden zwischen der pyrometallurgische und hydrometallurgische Variante unterschieden. Bei der pyrometallurgischen Art erfolgt eine Verbrennung mit Hochtemperaturen. Die hydrometallurgische Art löst Metalle heraus indem sie mit Chemikalien arbeiten. Diese Recyclingmethoden benötigen jeweils sehr große Mengen an Energie (vgl. Specht 2016).

2.4 Unterschiede zu konventionellen Fahrzeugen

Abgesehen vom ökologischen Aspekt, liegt der Hauptunterschied zwischen elektrisch betriebenen und konventionellen Fahrzeugen beim Antriebssystem. Durch ihren unterschiedlichen Aufbau entstehen viele Vor- als auch Nachteile.

Zunächst zum Aufbau des Elektrofahrzeugs. Elektrofahrzeuge sind relativ einfach gebaut. Es besteht im Gegensatz zum konventionellen Fahrzeug aus wenigeren Bestand- und Verschleißteilen. Bauteile wie beispielsweise der Generator, der Tank oder das Schaltgetriebe fallen weg (vgl. Karle 2017: 23). Somit entstehen für das Elektroauto weniger Wartungs- als auch Betriebskosten. Des Weiteren ist der Elektromotor verglichen zum



Verbrennungsmotor energieeffizienter. Zusätzlich mit dem Vorgang der Rekuperation, liegt der Wirkungsgrad des Elektromotors bei mehr als 90% (vgl. Karle 2017: 21). Hingegen liegt der Wirkungsgrad beim Verbrennungsmotor bei maximal 40%, da bei der Energieumwandlung in mechanische Energie nebenbei auch viel thermische Energie umgewandelt wird. Durch Einsatz eines Elektromotors lässt sich das Fahren eines Elektroautos mit dem Nutzen eines Fahrzeugs mit Automatikgetriebe vergleichen. Dadurch, dass das volle Drehmoment beim Elektromotor schon von Anfang an bereitsteht, kann auf ein Schaltgetriebe verzichtet werden und trotzdem können alle Geschwindigkeitsbereiche gefahren werden.

Ein Elektroauto produziert beim Fahren von niedrigen Geschwindigkeiten kaum Lärm und ist zudem lokal emissionsfrei (vgl. Peren et al. 1997: 62). Das kommt vor allem den Großstädten oder den stark besiedelten Gebieten vorteilhaft. Dadurch kann die ohnehin erhöhte Luftverschmutzung in diesen Regionen reduziert werden. Außerdem vermindert es die Fassadenverschmutzung in den Städten (vgl. Peren et al. 1997: 62). Jedoch muss beachtet werden, dass die globale Emissionsfreiheit von Elektroautos von ihrer Stromerzeugung und somit von der Energiewirtschaft des Staates abhängt. Zudem wurde im Kapitel 2.3 näher eingegangen.

Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen ist der Lärmpegel von Elektroautos relativ gering (vgl. Karle 2017: 168). Denn meist bei stark befahrenen Straßen, kommt es zu Lärmbelästigungen. Bei einer Geschwindigkeit von unter 30 km/h dagegen sind Elektrofahrzeuge nahezu geräuschlos (vgl. Schoblick 2013: 86). Das kann positive als auch negative Folgen haben. Durch den geringen Lärmpegel können Risiken für andere Verkehrsteilnehmer entstehen. Diesbezüglich können bei niedrigen Geschwindigkeiten künstliche Motorengeräusche eingeführt werden (vgl. Schoblick 2013: 86). Im anderem Fall beispielsweise auf Autobahnen sind bei hohen Geschwindigkeiten die Rollgeräusche der Reifen des Elektrofahrzeugs hörbar (vgl. Schoblick 2013: 86). Im Gesamten betrachtet sind Elektroautos relativ leiser als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Durch die Reduzierung des Lärmpegels kann besonders den Stadtbewohnern eine bessere Lebensqualität zugesichert werden (vgl. Karle 2017: 22).



Trotz dieser Vorteile, kann ein Elektroauto konventionelle Fahrzeuge im Bereich Reichweite derzeit nicht mithalten. Elektrofahrzeuge haben eine eingeschränkte Reichweite. Durch Einflüsse von der Temperatur als auch von der Geschwindigkeit wird diese Einschränkung beeinflusst. Zudem kommt hinzu, dass das Aufladen zu lange Ladezeiten benötigt (vgl. Karle: 2017: 24).

Beim Aufladen des Elektrofahrzeugs wird zwischen Gleichstrom (DC) und Wechselstrom (AC) unterschieden. Bei der AC-Ladung gibt es dabei die einphasige und die dreiphasige Variante (vgl. Karle 2017: 97). Je nach Ladeart gibt es unterschiedliche Ladeleistungen. Aufgrund der geringen Ladeleistung kann eine Vollaufladung mit der einphasigen AC-Ladung etwa 6 bis 8 Stunden dauern (vgl. Karle 2017: 97). Deswegen ist diese Methode nur in der Garage oder auf privaten Stellplätzen beispielweise zum Aufladen über die Nacht geeignet. Eine schnellere Ladung für den öffentlichen Raum ist mit der dreiphasigen AC-Ladung möglich, dessen Ladedauer bis zu eine Stunde dauern kann (vgl. Karle 2017: 98). Im Gegensatz zur AC-Ladung entspricht das Laden mit Gleichstrom einer Schnellladung. Hohe Ladeleistungen sind möglich, sodass das Elektrofahrzeug innerhalb von 30 Minuten fast vollständig aufgeladen ist (vgl. Karle 2017: 98). Diese DC-Ladung kann für Überlandfahrten angewendet werden. Jedoch ist bisher die schnellste Ladevariante eines Elektroautos im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen mit Zeitkosten verbunden. Diese Probleme gibt es bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren nicht, denn das Fahren als auch das Tanken erfolgt bequem.



Kapitel 3 Analyse der Reichweitenabhängigkeit

Die Reichweite, welche ein Fahrzeug ohne Nachtanken bzw. Nachladen erreichen kann, bildet ein aussagekräftiges Kriterium zur Wahl eines geeigneten Fahrzeugtyps. Da Elektroautos meist geringere Reichweiten als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren erreichen können, erfolgt deren Akzeptanz bzw. Adaption nur schleppend. Erkennbar ist dies an der aktuellen Anzahl an Elektroautos. Die Bundesregierung möchte den Umstieg zu Elektrofahrzeugen fördern und hat sich demgemäß das Ziel gesetzt bis 2020 eine Millionen Elektroautos auf den Straßen Deutschlands zu bringen. Doch bisher liegt die Zahl bei etwa 34.000 (vgl. Statista 2017b). Dabei gibt es etwa 45 Millionen Personenkraftwagen in Deutschland (vgl. Statista 2017c). Daher ist die Reichweite ein wichtiger Faktor bei der Wahl eines Fahrzeugs bzw. bei der Durchsetzung von Elektroautos am Markt.

3.1 Einflussfaktoren

Obwohl bei einigen Herstellerangaben große Reichweiten angegeben werden, sind diese nur bedingt praxistauglich. Zwar wird beispielsweise beim Tesla Model S angegeben, dass er eine elektrische Reichweite von bis zu 490 km erreichen kann. Jedoch kann sich diese im Winter drastisch reduzieren. Denn bei niedrigen Temperaturen steigt der Innenwiderstand der Lithium-Ionen-Akkus. Die Ionen werden träge und ihre Leistungsfähigkeit sinkt ebenfalls. Abgesehen von den Temperaturen kommen viele weitere Einflussfaktoren hinzu, die die Reichweite negativ beeinflussen können (vgl. Smuts et al. 2017: 6). Dazu zählen unter anderem die Fahrzeugmasse, die Akkukapazität, der Energieverbrauch, die Geschwindigkeit sowie das Fahrverhalten des Fahrers (vgl. Smuts et al. 2017: 6).

Die folgenden Beschreibungen der Einflussfaktoren beruhen auf Smuts et al. (2017: 3f.).

Fahrstrecke

Sowohl der Straßenbelag als auch die Straßenebene können großen Einfluss auf den Energieverbrauch und somit auch auf die Reichweite nehmen. Auf die Topografie der Fahrstrecke muss geachtet werden. Beispielsweise bei Fahrten in den Bergen verringert sich die Reichweite, da es oft Straßensteigungen gibt.



Außentemperaturen und Wetterbedingungen

Zu diesen externen Faktoren zählen die Außentemperaturen oder auch die Wetterlage, ob es regnet, schneit oder windig ist. Zusätzlich zu den Sommer- und Wintermonaten muss der Fahrzeuginnenraum gekühlt bzw. beheizt werden, wozu Energie aus dem Akku verwendet wird.

Fahrverhalten/-stil

Auch das individuelle Fahrverhalten wirkt sich auf den Energieverbrauch aus. Durch aggressives Fahrverhalten mit hohen Geschwindigkeiten und nicht vorrausschauender Fahrweise steigt zusätzlich der Energieverbrauch.

Fahrzeugmodell

Der Aufbau eines Elektrofahrzeugs wirkt sich ebenfalls auf den Energieverbrauch aus. Dazu gehören beispielsweise seine Fahrzeugmasse oder seine Form, welche Auswirkungen auf den Luftwiderstand haben.

Akkukapazität

Je höher die Akkukapazität ist, desto höher ist auch die Reichweite. Für Elektroautos werden daher meist Lithium-Ionen-Akkus eingesetzt, da sie eine vergleichsweise hohe Energie- und Speicherdichte aufweisen.

3.2 Modellerstellung

In dieser Arbeit liegt der Hauptschwerpunkt darin, wie die Reichweite für verschiedene Nutzergruppen zu unterschiedlichen Temperaturen beeinflusst wird. Demzufolge bilden Temperatur und Geschwindigkeit die exogenen Variablen im Modell. Deswegen werden für diese Variablen Temperatur und Geschwindigkeit in Relation zu der Reichweite separate Modelle erstellt und sie zum Schluss zusammengeführt.



3.2.1 (Außen-)Temperatur

Anhand einer Studie des Österreichischen Vereins für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK) und des Österreichischen Automobil-, Motorrad und Touring Clubs (ÖAMTC) im Jahr 2012 wurden verschiedene Messwerte zur Reichweite verschiedener Elektroautomodelle zu unterschiedlichen Umgebungstemperaturen gemessen.

In dem Experiment werden keine realitätswirklichen Testverfahren durchgeführt. Der Fahrbetrieb findet auf einem Rollenprüfstand statt. Er erfolgt so lang bis die maximale Reichweite erreicht wird (vgl. Geringer, Tober 2012: 5). Der Rollenprüfstand ist zudem klimatisiert, sodass die Umgebungstemperatur individuell geregelt werden kann. Dabei sind Temperaturen von -30°C bis zu maximal 50°C möglich (vgl. Geringer, Tober 2012: 9). Dadurch, dass der Fahrbetrieb auf einem Rollenprüfstand erfolgt, wird von einer durchschnittlichen Fahrweise als auch von einer geringen Fahrbahnneigung ausgegangen (vgl. Geringer, Tober 2012: 24). Um möglichst realitätsnahe Daten (wie bei einer normalen Fahrt) zu messen, wird beim Fahrbetrieb jeweils die Heizung bzw. die Klimaanlage aktiviert, sodass der Fahrzeuginnenraum auf etwa 22°C gebracht wird. Außerdem erfolgt auch die Einschaltung des Radios. Zusätzlich werden bei den Elektroautos, falls vorhanden, der Automatikmodus für die Temperatur- und Gebläsestufe als auch das Tagfahrlicht aktiviert. Besitzt das Auto diese Funktionen nicht, so wird die Temperatur manuell geregelt und das Gebläse auf die mittlere Stufe eingestellt (vgl. Geringer, Tober 2012: 5). Für die folgenden Elektroautomodelle erfolgte der angeführte Test: Mitsubishi i-MiEV, Mercedes Benz A-Klasse E-Cell, Smart Fortwo Electric Drive, Nissan Leaf und Citroën Berlingo. Es handelt sich nur um rein elektrisch betriebene Fahrzeuge. Die gemessenen Messwerte zur Reichweite werden in der Tabelle 1 dargestellt. Die Werte vom Jahr 2012 sind nicht mehr aktuell. Heutzutage können Elektroautos höhere Reichweiten erreichen, aber für die Auswertung der Reichweitenabhängigkeit sind diese Daten ausreichend, da nur der Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Reichweite eine Rolle spielt.

Die Außentemperatur wirkt sich besonders auf den Lithium-Ionen-Akku aus, da die optimale Leistungsfähigkeit des Akkus bei $18-25^{\circ}\text{C}$ liegt (vgl. Karle 2017: 80). Wird diese Temperatur nicht erreicht, so verringert sich die Leistungsfähigkeit und der Wirkungsgrad des Akkus, sodass eine geringere Reichweite gemessen wird. Außerdem muss dementsprechend bei zu



hohen oder zu niedrigeren Außentemperaturen im Fahrzeuginnenraum geheizt bzw. gekühlt werden. Dies erfolgt mithilfe von Klimaanlageanlagen und Heizungen, welche ebenfalls durch elektrische Energie aus dem Akku betrieben wird. Das bedeutet, dass die Energie aus dem Akku durch zusätzliche elektrische Geräte belastet wird. Somit steht für die Reichweite eine geringere Energiemenge zur Verfügung.

Fahrzeug	Umgebungstemperatur					
	+30°C Inkl. Klima- anlage	+20°C ohne Klima- anlage und Hei- zung	+10°C Inkl. Heizung	0°C Inkl. Heizung	-10°C Inkl. Heizung	-20°C Inkl. Heizung
Mitsubishi i-MiEV	101 km	108 km	88 km	73 km	66 km	57 km
Mercedes Benz A- Klasse E-Cell	147 km	175 km	147 km	126 km	110 km	90 km
Smart Fortwo Electric Drive	97 km	125 km	106 km	89 km	77 km	70 km
Nissan Leaf	95 km	101 km	90 km	78 km	66 km	56 km
Citroën Berlingo	86 km	85 km	81 km	79 km	76 km	68 km

Tabelle 1: Reichweitenwerte zu bestimmten Umgebungstemperaturen im Jahr 2012

(Quelle: In Anlehnung an Geringer, Tober 2012: 24ff.)

Auffallend sind die Werte des Citroën Berlingo in Tabelle 1. Auch bei +30°C mit Nutzung der Klimaanlage ist die gemessene Reichweite höher als bei +20°C ohne Nutzung der Klimaanlage. Das liegt daran, dass beim Citroën Berlingo lediglich die Energie der Batterie für den Antrieb des Fahrzeugs verwendet wird. Für die Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums



ist eine benzinbetriebene Standheizung zuständig (vgl. Geringer, Tober 2012: 47). Demzufolge werden für die folgende Analyse bei der Regression die Reichweitenwerte des Citroën Berlingo nicht miteinbezogen.

Mit dem Excel Programm von Microsoft oder IBM SPSS werden die gemessenen Werte anhand eines Streudiagramms grafisch dargestellt, welche in der Abbildung 3 zu sehen ist. Durch Betrachtung des Diagramms ist eine exponentielle Abhängigkeit zu erkennen. Anhand der Werte kann erkannt werden, dass die maximale Reichweite der einzelnen Elektrofahrzeuge bei 20°C liegen. Dies unterstützt die im vorherigen Absatz aufgestellte These über den direkten Zusammenhang zwischen Reichweite und Temperatur. Bei dieser Temperatur wird die Klimaanlage nicht eingesetzt und zudem erreicht der Lithium-Ionen-Akku seine optimale Leistungsfähigkeit. Somit wird der Akku nicht zusätzlich belastet. Die Reichweite steigt mit zunehmender Temperatur bis sie die 20°C-Grenze erreicht und sinkt von da an ab.

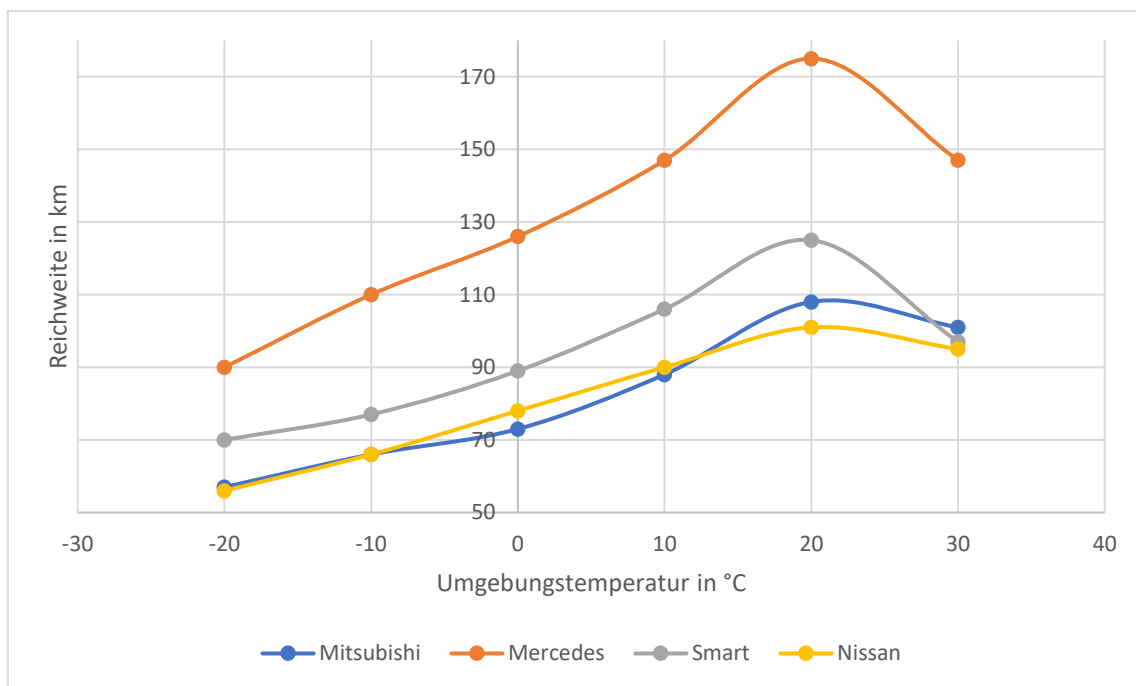


Abbildung 3: Grafische Darstellung der ermittelten Reichweitenwerte in Abhängigkeit von der Temperatur

Anhand der Grafik kann entnommen werden, dass ein gaußähnliches Verhalten zwischen der Reichweite und der Temperatur vorliegt. Eine quadratische Funktion wird nicht in Frage



kommen, denn grafisch dargestellt, wäre es eine nach unten geöffnete Parabel oberhalb der x-Achse und negative Reichweiten sind nicht möglich. Durch die Gaußfunktion wird dies verhindert. Hierbei wird die Reichweite multiplikativ modelliert, da die Temperatur die Reichweite um einen Prozentsatz ändert.

Aus physikalischen Gründen und der Statistik aus Abbildung 3 wird nun folgendes Modell angenommen:

$$z(x) = \exp(\beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2) \quad (1)$$

Um die Parameter in diesem nichtlinearen Regressionsmodell einfacher schätzen zu können, wird sie logarithmiert. Durch diese Transformation können aus Faktoren Summanden gebildet werden. Daraus ergibt:

$$\ln z(x) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 \quad (2)$$

Für die weitere Vorgehensweise wird folgende Formel verwendet:

$$y_1(x) = \ln z(x) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 \quad (3)$$

Wobei β_0 eine Konstante ist und β_1, β_2 Modellparameter sind und anhand der angegebenen Daten geschätzt werden müssen. Das am häufigsten verwendete Verfahren für die Parameterschätzung ist die Methode der Kleinsten Quadrate. Dadurch werden die Parameter so geschätzt, dass die Summe von Fehlerquadraten minimiert wird (vgl. Okhrin 2015: 3). Das bedeutet, der Parameter muss so gewählt werden, dass er so nah wie möglich zu den Wertepunkten passt.

Wird nun eine quadratische Funktion zum Beschreiben der untersuchten Reichweiten verwendet, ergibt sich mithilfe von Excel eine Regressionsfunktion mit der Formel:

$$y_1(x) = -0,0201x^2 + 1,2513x + 97,536 \text{ [km]} \quad (4)$$

Hierbei wird die Reichweite y_1 in Abhängigkeit von der Temperatur x dargestellt. Laut den Wertepaaren, wird die maximale Reichweite jedes einzelnen Elektroautos bei 20°C erreicht. Dadurch, dass das Elektromodell von Mercedes durch seine höhere Akkukapazität höhere Reichweiten als im Vergleich zu den anderen Kleinwagen erreicht, wird das Modell „verzerrt“. Wird das Maximum der Funktion ermittelt, so liegt diese bei etwa 31°C.



Diese Formel wird für alle Elektroautomodelle angewendet, da davon ausgegangen wird, dass sich der Temperatureinfluss auf alle Elektromodelle gleich auswirkt. Die Temperatur ist ein externer natürlicher Faktor, der nicht vermieden werden kann.

3.2.2 Geschwindigkeit

Neben der Temperatur ist die Reichweite ebenso abhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeuges. Mithilfe eines Mikromodells kann der Energieverbrauch abhängig von der Geschwindigkeit beschrieben werden.

Bei Mikromodellen wird die kleinste sinnvollste Einheit betrachtet. Verglichen zum Makromodell werden beim Verbrauchsmodell nach mikroskopischen Ansatz, das individuelle Fahrverhalten oder auch die Fahrzeugeinheiten wie beispielsweise die Fahrzeugmasse oder die Frontfläche des Fahrzeugs berücksichtigt (vgl. Treiber, Kesting 2010: 275). Demzufolge werden diese Einheiten analysiert, um ihre Auswirkung auf den Verkehr zu beschreiben. Mikromodelle werden häufig verwendet, um die Auswirkung einzelner Verhaltensweisen der verschiedenen Einheiten auf eine Verkehrssituation unter anderem von Verkehrsstaus oder Stop-and-Go-Verkehr zu simulieren. Dadurch können sie bei der Entscheidungsfindung unter anderem für die Verkehrsmittelwahl unterstützen.

Für das kommende beschriebene Verbrauchsmodell wird ein physik-basiertes Modell verwendet. Ausgangsformel hierfür ist die Berechnung für die elektrische Leistung P:

$$P = F \times v \quad (5)$$

Die Leistung bildet sich aus dem Produkt des Fahrwiderstandes F und der Geschwindigkeit v. Das Elektroauto benötigt im Grunde genommen eine entsprechende Leistung, sodass der Fahrwiderstand überwunden wird und somit das Elektroauto betrieben werden kann. Die Formel für den Fahrwiderstand F setzt sich wie folgt zusammen:

$$F = F_T + F_R + F_S + F_L \quad (6)$$

(vgl. Schoblick 2013: 63).



Die Kraft ist eine vektorielle Größe. Aber für die Berechnung sind jeweils nur die Beträge relevant. Anhand dieser Formel sind jeweils die Einflussgrößen auf den Leistungsbedarf erkennbar, die sich wie folgt zusammensetzen:

- Trägheitskraft F_T : Die Trägheitskraft bildet das Produkt aus der Masse des Fahrzeugs und der Beschleunigung. Die Beschleunigung ist die Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit, so dass gilt: $a = \dot{v} = \frac{dv}{dt}$ (vgl. Schoblick 2013: 58). So setzt sich die Formel für die Trägheitskraft folglich zusammen: $F_T = m\dot{v}$. Je größer die Masse des Fahrzeugs ist, desto mehr Kraft wird benötigt um ihn zu beschleunigen (vgl. Schoblick 2013: 63).
- Reibungskraft F_R : Die Roll- und Festkörperreibung ist zwar unabhängig von der Geschwindigkeit, hängt aber von der Gewichtskraft mg ab. Dabei ist g eine Konstante und die Erdbeschleunigung, die auf der Erde in etwa $9,81 \text{ m/s}^2$ beträgt. Je höher die Gewichtskraft ist, desto höher ist auch die Reibung. Deswegen lautet die Formel für die Berechnung der Reibungskraft: $F_R = \mu mg$ (vgl. Treiber, Kersting 2010: 278). Dabei ist μ der Reibungskoeffizient. Auf Straßenbelägen wie Asphalt, wo eine größere Reibung entstehen kann, ist die Reibungszahl auch größer. Beispielsweise auf trockenen Asphaltstraßen beträgt die Reibungszahl zwischen 1 und 1,5. Andererseits auf vereistem Asphalt beträgt sie 0,2 (vgl. Schoblick 2013: 64).
- Hangabtriebskraft F_S : Straßen verlaufen niemals eben, deswegen haben Steigungen bzw. Gefälle auch Einflüsse auf den Antrieb. Zusätzlich ist die Hangabtriebskraft auch abhängig von der Gewichtskraft mg , deswegen lautet hierfür die Formel für die Hangabtriebskraft: $F_S = mgsin\alpha$ (vgl. Schoblick 2013: 67). Der Winkel der Steigung bzw. des Gefälles wird mit α beschrieben.
- Luftwiderstand F_L : Bei der Berechnung des Luftwiderstandes werden neben der unbeeinflussbaren Luftdichte mit $\rho \approx 1,3 \text{ kg/m}^3$, die Stirnfläche bzw. die Querschnittsfläche A von vorne des Fahrzeugs, welche bei typischen Fahrzeugen bei etwa 2 m^2 liegt und der Luftwiderstandsbeiwert c_w berücksichtigt. Bei modernen Fahrzeugen liegt der c_w -Wert zwischen 0,25 und 0,35 (vgl. Treiber, Kersting 2010: 278). Der Luftwiderstand hängt auch von der Geschwindigkeit ab. Sie wirkt quadratisch, sodass die



Formel für den Luftwiderstand: $F_L = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2$ lautet (vgl. Treiber, Kesting 2010: 278).

Werden all diese Einflussgrößen berücksichtigt und in die Formel (6) eingefügt, so kann für den Fahrwiderstand folgende Gleichung erhalten werden:

$$F = m\dot{v} + (\mu + \alpha)mg + \frac{1}{2} c_w \rho A v^2 \quad (7)$$

Außerdem müssen zusätzlich die Leistungen aller zum Fahrbetrieb benötigten elektrischen Geräte unter anderem die Heizung, Klimaanlage, Lüftung, Licht bzw. allgemein welche zum Leistungsverlust führt, miteinbezogen werden. Es handelt sich hierbei um die Betriebsleistung P_0 , welche in (5) hinzugefügt wird. Daraus ergibt sich:

$$P = P_0 + F \times v \quad (8)$$

Das Skalarprodukt von zwei Vektoren ist definiert als Multiplikation der Beträge und der Cosinus deren Winkel, den sie einschließen. Des Weiteren wirkt die Kraft parallel zur Geschwindigkeit. Daraus folgt, dass der Cosinus gleich 1 wird. So kann der Energieverbrauch des Elektroautos pro 100 km ermittelt werden. Daraus ergibt sich die Gleichung:

$$\frac{\Delta W}{\Delta y_2} = \frac{P_0}{v} + F \quad (9)$$

W ist das Formelzeichen für die mechanische Arbeit und entspricht hier die Akkukapazität. Denn die elektrische Energie wird für den Antrieb in mechanische Energie umgewandelt. Durch den Energieerhaltungssatz wird angenommen, dass ein Wirkungsgrad von 100% vorliegt. Wird nun (7) in (9) eingesetzt, ergibt sich:

$$\frac{\Delta W}{\Delta y_2} = \frac{P_0}{v} + m\dot{v} + (\mu + \alpha)mg + \frac{1}{2} c_w \rho A v^2 \quad (10)$$

Werden nun für die jeweiligen „Einflussgrößen“ Parameter eingeführt, sodass nur noch die Geschwindigkeit v als Funktion übrigbleibt, so lautet die Gleichung:

$$\frac{\Delta W}{\Delta y_2} = \frac{\beta_0}{v} + \beta_1 + \beta_2 v^2 \quad (11)$$

Die Berechnung der Parameter β_k erfolgt mit den typischen Werten aus der Tabelle 2.



Grundleistung	P_0	3 kW=3000 W
Reibungskoeffizient	μ	0,02
Steigung der Straße	α	0
Erdbeschleunigung	g	9,81 m/s ²
c _w -Wert	c_w	0,3
Luftdichte	ρ	1,3 kg/m ³
Stirnfläche des Fahrzeugs	A	2 m ²
Fahrzeugmasse	m	1500 kg

Tabelle 2: Typische Werte der Variablen zur Berechnung des Energieverbrauches

Somit lassen sich für die Modellparameter folgendes berechnen:

- $\beta_0 = P_0 = 3000 \text{ W}$
- $\beta_1 = \mu mg = 0,02 \times 1500 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 294,3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- $\beta_2 = \frac{1}{2} c_w \rho A = \frac{1}{2} \times 0,3 \times 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2 \text{ m}^2 = 0,39 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Die Gleichung lautet nun: $\frac{\Delta W}{\Delta y_2} = \frac{3000}{v} + 294,3 + 0,39v^2$. Wird diese Gleichung umgestellt,

kann die Reichweite berechnet werden mit:

$$y_2(v) = \frac{Wx100}{\frac{3000}{v} + 294,3 + 0,39v^2} \quad [\text{km}] \quad (12)$$

Am Beispiel des Renault Zoe mit einer Akkukapazität von 22 kWh wird die Reichweite in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit in Abbildung 4 dargestellt. Die Reichweite nimmt mit steigender Geschwindigkeit exponentiell ab.

Bei Betrachtung der Abbildung 4, sind die ausgerechneten Reichweiten wie bereits physikalisch diskutiert, berechtigt. Daher wird der Ansatz des Modells für die Geschwindigkeitsabhängigkeit für die Auswertung mit eingeführt.

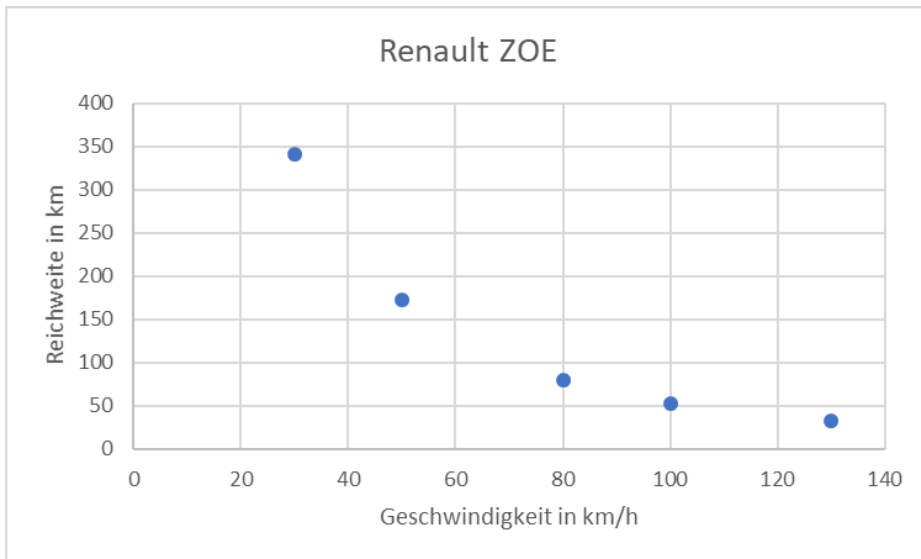


Abbildung 4: Grafische Darstellung der Reichweitenwerte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit am Beispiel des Renault Zoe

3.3 Modellzusammenführung

In der Realität sind die beschriebenen Einflussgrößen nicht unabhängig voneinander. Daher wird nun ein Term eingeführt, der die Abhängigkeit von den Faktoren Temperatur und Geschwindigkeit betrachtet.

$$y(x, v) = y_1(x) \times y_2(v) = \frac{-0,0201x^2 + 1,2513x + 97,536}{\frac{3000}{v} + 294,3 + 0,39v^2} W \times 100 \quad [\text{km}] \quad (13)$$

Aus der Formel ist erkennbar, dass mit zunehmender Geschwindigkeit v sich der Nenner vergrößert und so die Reichweite sich verringert. Die Akkukapazität ist direkt proportional zur Reichweite und kann hiermit trivial als Faktor hinzugefügt werden. Zudem befindet sich das Maximum der Temperatur bei etwa 31°C . Ist die Temperatur niedriger oder höher, so verringert sich ebenfalls die Reichweite, da durch den Term $-0,0201x^2$ das Verhältnis beschrieben wird. Auf dem beschriebenen Modell basiert die Auswertung im nächsten Kapitel.



Kapitel 4 Auswertung der Ergebnisse

Durch das erstellte Modell können nun mit Angabe von Temperatur und Geschwindigkeit die Reichweite berechnet werden. Zum Vergleich zur Realität werden die Werte des Renault Zoe mit einer Akkukapazität von 22 kWh genommen. Laut Herstellerangaben liegt seine elektrische Reichweite bei 240 km. Wird im Modell eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h und eine optimale Temperatur von 20 bzw. 30°C (aufgrund der Verzerrung im Temperaturmodell) angenommen, so ergibt sich eine berechnete Reichweite von 190 km. Zu erkennen ist dies in Abbildung 5. Es besteht eine Abweichung der Reichweitenwerte, da im Modell von einer durchgängigen Volleistung ausgegangen wird, welche bei realem Fahrbetrieb beispielsweise durch Beschleunigung und der Möglichkeit der Rekuperation, nicht möglich ist. Abgesehen von dieser Abweichung beschreibt das Modell die Reichweite in Relation von Temperatur und Geschwindigkeit.

Somit ist es möglich, Aussagen über die Alltagstauglichkeit eines Elektrofahrzeugs zu treffen.

$$y(x, v) = \frac{-0,0201x^2 + 1,2513x + 97,536}{\frac{3000}{v} + 294,3 + 0,39v^2} W \times 100 \quad [\text{km}] \quad (13)$$

Zunächst ist zum Begriff der Alltagstauglichkeit zu sagen, dass dieser von jeder Person anders definiert werden kann, da jeder den Alltag individuell gestaltet. Ein Objekt gilt als alltagstauglich, wenn es durch die Umstellung von konventionellen Fahrzeugen auf Elektroautos zu keinerlei Nachteilen bezüglich der Anwendung kommt. Die vorliegende Arbeit geht davon aus, dass wenn ein Elektroauto die Reichweiten für die alltägliche Nutzung besonders für Arbeits- und Freizeitwege erreichen kann, es als alltagstauglich gilt.

Demzufolge wird die Alltagstauglichkeit anhand von verschiedenen Nutzergruppen (Kurz- und Landstreckenfahrer) ausgewertet. Der Vergleich erfolgt anhand von Fahrstrecken auf verschiedenen Straßentypen, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten befahren werden können. Darunter zählen: Autobahnfahrten und Fahrten innerhalb und außerhalb geschlossener Ortschaften.



4.1 Fahrten innerhalb geschlossener Ortschaften

Auf Straßen innerhalb einer geschlossenen Ortschaft gilt die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Das Diagramm in Abbildung 5 stellt die prognostizierte Reichweite am Beispiel des Renault Zoe in Abhängigkeit von der Temperatur dar. Dieser Kleinwagen wiegt etwa 1500kg und besitzt eine Akkukapazität von 22 kWh. In Abbildung 5 lässt sich seine maximale Reichweite von etwa 190 km ablesen. Durch Betrachtung der extremen Temperaturwerte kann das Elektroauto eine Reichweite von etwa 85 km bis zu 190 km erreichen. Zum Vergleich zu den Temperaturbereichen in Deutschland lag im Jahr 2017 die niedrigste und höchste monatliche Durchschnittstemperatur bei $-2,3^{\circ}\text{C}$ und $18,1^{\circ}\text{C}$ (vgl. Statista 2018).

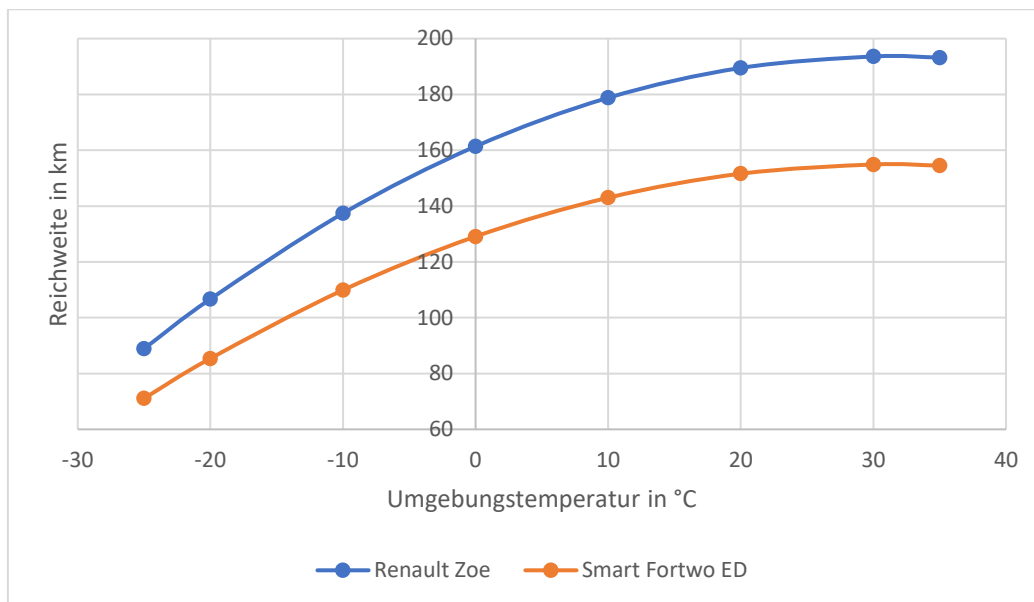


Abbildung 5: Reichweitenwerte eines Renault Zoe und eines Smart Fortwo ED in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h

Für die Definierung der Kurzstreckenfahrer werden die Daten des Deutschen Mobilitätspanel (MPO) herangezogen. MPO ist eine vom Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) beauftragte Erhebung, welche das Mobilitätsverhalten in Deutschland analysiert. Im Jahr 2015 betrug die durchschnittliche Verkehrsleistung 40,9 km je Person und Tag (vgl. KIT 2016: 40). Jede Person legt durchschnittlich drei Wege am Tag zurück. Dabei werden unter anderem die Wege zur Arbeit, für Erledigungen als auch für Freizeitaktivitäten mit inbegriffen. 18-60-Jährige legen am Tag durchschnittlich höhere Fahrstrecken von 48 km



zurück. Diese Distanz ist gemäß den Reichweitenwerten aus Abbildung 5 von einem elektrischen Kleinwagen bei einer Höchstgeschwindigkeit von 50km/h erreichbar.

Unter Nutzung derselben Formel ergibt sich bei der Berechnung für ein Smart Fortwo electric drive (ED) mit einer Akkukapazität von 17,6 kWh (vgl. Sommer 2017) und Temperaturverhältnissen von -25°C eine Reichweite von etwa 71 km. Demzufolge lassen sich auch die täglichen Verkehrsleistungen im Winter innerhalb geschlossenen Ortschaften mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h erreichen.

Somit lässt sich aussagen, dass Elektroautos für die Nutzung innerhalb der Stadt nach diesen Maßstäben als alltagstauglich bezeichnet werden können. Hierfür ist ein Kleinwagen mit einer Akkukapazität von etwa 20 kWh wie ein Renault Zoe oder ein Smart Fortwo ED auch ausreichend.

4.2 Fahrten außerhalb geschlossener Ortschaften

Bei Fahrten außerhalb geschlossener Ortschaften wie beispielsweise auf Landstraßen gelten für PKWs eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h.

Wird angenommen, dass ein Kleinwagen wie der Renault Zoe mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 100 km/h fahren würde, so würde er die Reichweiten wie in Abbildung 6 erreichen. Es ist erkennbar, dass ein Renault Zoe bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 100 km/h höchstens eine 60 km lange Fahrstrecke zurücklegen kann. Liegen die Temperaturen im Winter bei -10°C so beträgt die maximale Reichweite des Elektrofahrzeugs 43 km. Dies impliziert, dass während einer längeren Strecke eine Aufladung des Akkus aller 50 km erforderlich wäre. So lässt sich höchstens eine Hinfahrt beispielsweise für Berufspendler mit einem Arbeitsweg von 50 km nur knapp erreichen oder es muss Zwischengeladen werden. Dies führt dazu, dass Langstreckenfahrer mit einem Kleinwagen wie dem Renault Zoe, keine Fahrten von 60 km auf Straßen mit hohen Geschwindigkeiten von 100 km/h möglich sind.

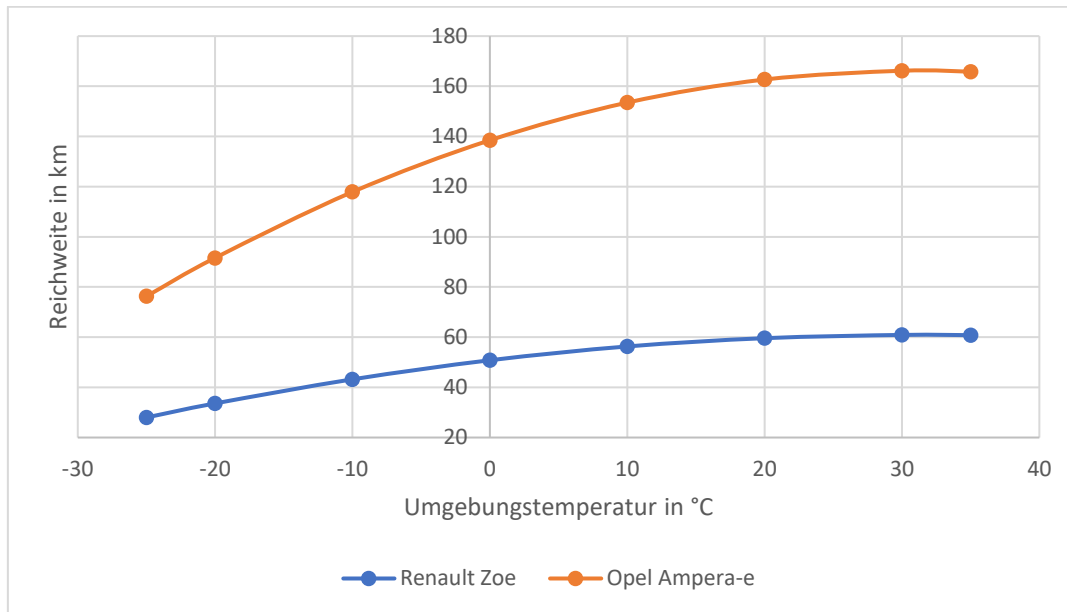


Abbildung 6: Reichweitenwerte eines Renault Zoe und eines Opel Ampera-e in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 100 km/h

Mittlerweile gibt es Fahrzeugkategorien wie die Tesla Modelle oder der Opel Ampera, die laut Herstellerangaben Reichweiten von 500 km erreichen können. Abbildung 6 stellt die Reichweitenwerte eines Opel Ampera-e bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 100 km/h dar. Diese ermöglicht die Auswertung von Elektroautos mit höheren Akkukapazitäten zu ihrer Praxistauglichkeit bei höheren Geschwindigkeiten zu machen. Die Akkukapazität eines Opel Ampera-e beträgt 60 kWh.

Abbildung 6 zeigt auf, dass der Opel Ampera-e bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 100 km/h eine maximale Reichweite von etwa 166 km bei optimaler Temperatur erreichen kann. Sind die Temperaturen jedoch höher als -10°C so kann das elektrische Fahrzeug eine Fahrstrecke von mindestens 110 km bedienen. Liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit bei 50 km/h, so könnte der Opel Ampera auch Reichweiten von 500 km erreichen, so wie es von den Herstellern angegeben wird.

Die starken Reichweitenverluste entstehen aufgrund des erhöhten Drucks von kälterer Luft. Während erwärmende Luft an Druck abnimmt, nimmt der Druck für abkühlende Luft zu. Somit nimmt auch der Luftwiderstand während einer Fahrt zu. Der Luftwiderstand nimmt bei sinkenden Temperaturen überproportional zu, weil dieser sich quadratisch zu der



Geschwindigkeit verändert. Daher ist der Faktor Geschwindigkeit in hohen Geschwindigkeitsbereichen und bei niedrigeren Temperaturen ein entscheidender Einflussfaktor auf die Fahrleistung eines Elektroautos.

4.3 Autobahn

Da bereits bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 100 km/h ein Kleinwagen wie ein Renault Zoe nur Reichweiten von höchstens 60 km erreichen konnte, werden nur die möglichen Reichweitenwerte von einem Opel Ampera-e mit einer höheren Akkukapazität ermittelt. Auf der Autobahn gibt es eine Richtgeschwindigkeit von 130 km/h.

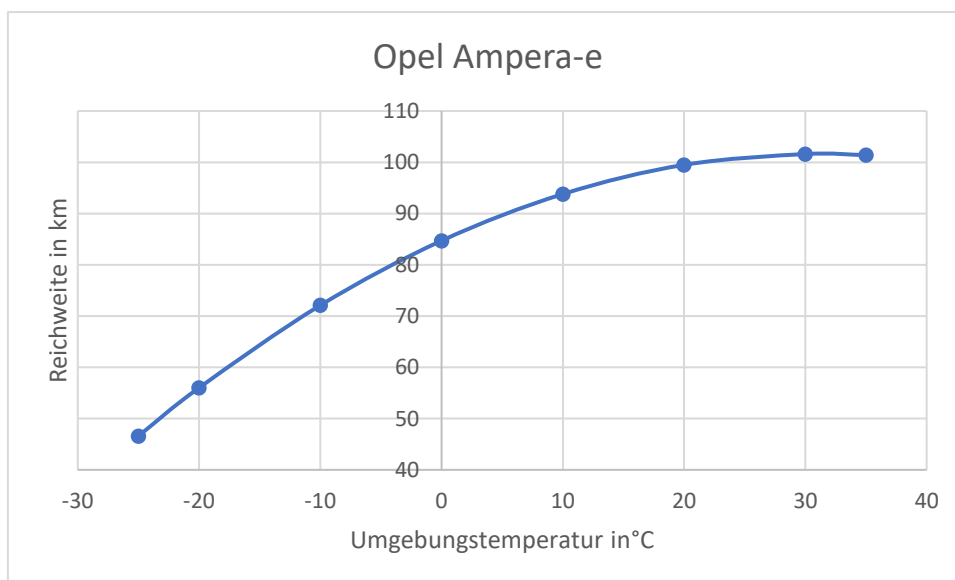


Abbildung 7: Reichweitenwerte eines Opel Ampera-e in Abhängigkeit von der Temperatur mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 130 km/h

Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 130 km/h und einer optimalen Temperatur erreicht der Opel Ampera-e nur knapp die Reichweitengrenze von 100 km. Hingegen im Winter, wenn die Temperaturen bei etwa -10°C liegen, sind es 72 km. Möchte beispielsweise eine Familie im Sommer 300 km für ein Urlaubsziel zurücklegen, so müssten sie während der Fahrt das Fahrzeug mindestens dreimal aufladen. Im Winter könnten es bis zu fünf Ladevorgänge werden.



4.4 Schlussfolgerung

Durch die Erstellung der Diagramme lässt sich aussagen, dass Kurzfahrstrecken bis zu 50 km sowohl auf Stadtstraßen als auch auf Autobahnen (jedoch nur mit einem Elektroauto mit höherer Akkukapazität) möglich sind. Für Langstreckenfahrer sollte die Fahrt auf Hochgeschwindigkeitsstraßen vermieden werden, denn aufgrund des erhöhten Fahrwiderstandes sind keine Fahrten ab etwa 60 km möglich. Fährt das Elektroauto durchgängig mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h so sind hiermit lange Fahrten wie laut den Herstellerangaben möglich.

In der Realität werden die Reichweitenwerte abweichen, da in diesem Modell viele Einflussfaktoren nicht berücksichtigt wurden. Außerdem wird im Modell davon ausgegangen, dass die Leistung beim Elektroauto durchgängig konstant bleibt. Beispielsweise wird der Vorgang zur Rekuperation vernachlässigt, welches durch die Bremsenergierückgewinnung wieder Energie in den Akku einspeisen kann.

Zusammenfassend haben die Geschwindigkeit als auch die Temperatur große Einflüsse auf die Reichweite eines Elektroautos. Durch Betrachtung der ausgewerteten Diagramme lässt sich aussagen, dass Elektrofahrzeuge zunächst nur in Städten ihre Alltagstauglichkeit beweisen können. Denn bei niedrigen Geschwindigkeiten entsteht kein großer Fahrwiderstand, der den Antrieb des Fahrzeugs enorm beeinträchtigen könnte. Weiterhin können die Fahrstrecken wie laut Herstellerangaben innerhalb geschlossener Ortschaften zurückgelegt werden, sodass auch die durchschnittliche Verkehrsleistung der Deutschen erreicht werden kann.

Das Modell trifft Aussagen zur Reichweite in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit. Durch die erhöhte Geschwindigkeit kann der Fahrwiderstand so groß werden, dass sogar mit einem reichweitenstarken Auto wie das Opel Ampera-e, das unter Herstellerangaben 500 km schafft, einer Reichweitenreduzierung auf bis zu 100 km erfahren kann. Daraus lässt sich erschließen, dass Fahrten auf Hochgeschwindigkeitsstraßen nur mit häufigem Aufladen befahrbar sind, welches wiederum mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist. Hierfür wird eine gutausgebaute Ladeinfrastruktur benötigt, die schnelles Aufladen ermöglichen kann. Jedoch beschleunigt häufiges und schnelles Aufladen die Alterung der Akkus.



Letztendlich ist das Elektrofahrzeug zunächst nur für den Betrieb in der Stadt alltagstauglich. Es wird bereits daran geforscht die Reichweiten eines Elektroautos zu erhöhen.

Es gibt Automobilhersteller, die daran arbeiten leichtere Elektrofahrzeuge herzustellen. Dabei hat die Masse nur einen geringen Einfluss auf den Energieverbrauch. Anhand der Formel (10) lässt sich erkennen, dass die Masse zusammen mit der Beschleunigung wirkt. Denn durch die Möglichkeit der Rekuperation kann beispielsweise beim Bremsen die freiwerdende Energie wieder in den Akku eingespeist werden. Demzufolge führt eine Gewichtsreduzierung nur zu geringen Verbesserungen bezüglich der Reichweite. Des Weiteren arbeiten die Hersteller auch daran die Akkukapazität zukünftig zu erhöhen. Dies kann durch Erhöhung der Energiedichte des Akkus oder durch die Entwicklung von Alternativen wie der Lithium-Luft-Akku ermöglicht werden (vgl. Karle 2015: 81).

Wie bereits erwähnt, erhöht sich die Reichweite mit steigender Akkukapazität. Mit dieser Maßnahme können höhere Reichweiten erreicht werden, jedoch bleibt die Auswirkung der Temperatur weiterhin bestehen. Im Winter haben Akkus aufgrund der niedrigen Temperaturen einen hohen Innenwiderstand. Dadurch verlangsamen sich die chemischen Prozesse und der Akku wird ineffizient (vgl. Füßel 2017:93). Im Gegensatz zum Sommer werden die chemischen Prozesse und somit auch die Alterung der Akkus beschleunigt (vgl. Füßel 2017: 52). Hinzufügend muss der Fahrzeuginnenraum über das Jahr beheizt bzw. gekühlt werden, welcher wiederum den Akku durch zusätzlichen Energieverbrauch belastet.

Um diese Problematik beheben zu können, müssen optimale Klimatisierungssysteme entwickelt werden. Im nächsten Kapitel werden diese vorgestellt.



Kapitel 5 Energieeffiziente Klimatisierung von Elektroautos

Der hohe Wirkungsgrad der Antriebssysteme eines Elektrofahrzeugs ist vorteilhaft für seine Leistungsfähigkeit. Stattdessen fehlt durch die geringe Umwandlung von elektrischer in thermische Energie die benötigte Beheizung für die Antriebssysteme, besonders für den Akku. Denn der Lithium-Ionen-Akku reagiert empfindlich auf die Temperatur. Ihre optimale Leistungsfähigkeit liegt bei 18-25°C. Sind die Außentemperaturen höher, verringert sich die Lebensdauer des Akkus, weil sich hierdurch die chemischen Prozesse beschleunigen (vgl. Karle 2017: 82). Hingegen im Winter verlangsamen sich die chemischen Prozesse und die Ionen werden träge. Außerdem muss ebenfalls der Fahrzeuginnenraum in eine angemessene Temperatur gebracht werden. Besonders im Winter muss dementsprechend beheizt werden. Hierfür gibt es verschiedene Klimatisierungsmöglichkeiten.

Als Beispiel können die Reichweitenwerte des Citroën Berlingo aus Tabelle 1 entnommen werden. Beim Citroën Berlingo wird eine brennstoffbetriebene Standheizung verwendet. Dadurch wird für die Temperaturoptimierung keine zusätzliche Energie aus dem Akku entnommen. Die gespeicherte Energie im Akku kann somit nur für den Antrieb des Fahrzeugs verwendet werden. Zwar wird die Reichweite weiterhin durch die niedrigen Temperaturen beeinflusst. Jedoch kann hierdurch der Reichweitenverlust reduziert werden. Unter diesen Bedingungen würde das Elektrofahrzeug aber kein ZEV mehr sein und würde zusätzlich einen Kraftstofftank benötigen. Deshalb müssen andere Klimatisierungsoptionen entwickelt werden.

Flächenheizung

Eine Möglichkeit ist die Flächenheizung. Es handelt sich hierbei um hauchdünne Folien bestehend aus einem leitfähigem Material beispielsweise Kupfer, die für Wärme sorgen kann. Diese Folie wird im Fahrzeuginnenraum beklebt und strahlt von dort aus Wärme aus (vgl. Walz 2015, Ackermann et al. 2013: 2). Das Prinzip der Heizung erfolgt nach dem Joul'schen Gesetz, welches „besagt, dass in einem Stromkreis die erzeugte Wärme proportional der



Leistung des Stromkreises ist.“ (Preuß 2017). Das bedeutet, dass wenn Strom durch die Folie fließt, so entsteht dabei Wärme (vgl. Walz 2015).

Wärmepumpe

Das Prinzip einer Wärmepumpe erfolgt wie eine Klimaanlage (vgl. Schmidt). Demzufolge kann sie für das Erwärmen als auch für das Kühlen des Fahrzeuginnenraums fungieren. Durch ihre Verwendung kann der Energiebedarf für die Klimatisierung reduziert werden, da sie nur eine geringe Energiemenge benötigt um daraus viel Wärme produzieren zu können (vgl. Karle 2017: 134). Bei Wärmepumpen wird der COP-Wert angegeben. Dieser Koeffizient steht für Coefficient of Performance und bedeutet, dass um dieses Vielfache die Heizleistung verringert wird (vgl. Karle 2017: 134). Je höher der Koeffizient ist, desto energieeffizienter ist die Wärmepumpe.

Heizen mit Bioethanol

Die Nutzung einer Heizung mit Bioethanol ist zugleich batterieunabhängig und wirkt sich nicht auf die Reichweite oder auf die Abgase aus. Der einzige Nachteil bei diesem Betrieb ist das erforderliche Nachtanken des Biokraftstoffes (vgl. Karle 2017: 134).

Abgesehen von der Nutzung eines externen Heiz- und Kühlsystems gibt es weitere Optimierungsmöglichkeiten zur Vermeidung der Reichweitenverluste aufgrund der Außentemperatur. Die folgenden Lösungsvorschläge erfolgen nach Schoblick (2013: 56).

Um die Leistungsfähigkeit des Akkus zu kalten Jahreszeiten aufrechtzuerhalten, ist eine Wärmedämmung der Akku möglich. Somit kann der Akku im Winter „warm gehalten“ werden. Jedoch wirkt sich dieser Vorschlag negativ für den Sommer auf, denn durch die Dämmung ist die Wärmeabgabe nicht mehr durch das Gehäuse möglich. Heutzutage gibt es Akkus, die ein Flüssigkeitsklimasystem beinhalten. Dieser ermöglicht es sowohl den Wärmeaustausch als auch die Temperaturen im Gehäuse optimal zu halten. Ein weiterer Lösungsvorschlag, der bereits in der Praxis angewendet wird, ist die Vorklimatisierung des Fahrzeugs. Dabei wird während dem Aufladen das Fahrzeug durch zugeführten Strom in eine optimale Temperatur gebracht. Somit ist keine interne Klimaanlage nötig. Eine andere Idee ist es Solarzellen auf dem Fahrzeugdach anzubauen. Die Solarzellen können die



Batterie allerdings nicht aufladen. Sie können jedoch Energie für die Nutzung von elektrischen Geräten wie der Lüfter zur Verfügung stellen. Zusätzlich können im Sommer die Fensterscheiben optimiert werden, um die Wärme der Sonneneinstrahlung zu vermindern (vgl. Karle 2017: 133). Jede mögliche Optimierung kann dazu führen, dass der Heiz- bzw. Kühlbedarf verringert werden kann.



Kapitel 6 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund des steigenden Umweltbewusstseins auf Seiten der Industrieländer besteht das Ziel von konventionellen Fahrzeugen auf Elektroautos umzusteigen. Damit dieser Umstieg erfolgreich umgesetzt werden kann, muss die Praxistauglichkeit von Elektrofahrzeugen bewiesen werden. Hierzu zählt besonders die Reichweite, die Elektrofahrzeuge fahren können. Jedoch wird die Reichweite unter anderem von der Temperatur und der Geschwindigkeit reduziert. Deshalb soll diese Arbeit die Frage: „Sind E-Autos alltagstauglich oder werden sie dies in der Zukunft sein?“ beantworten. Zu diesem Zweck wurde zur Ermittlung der Reichweitenwerte eines E-Autos ein Modell zur Darstellung der Abhängigkeit von Temperatur und Geschwindigkeit erstellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass Elektroautos nur im Stadtverkehr praxistauglich sind. Innerhalb geschlossener Ortschaften können durchschnittliche Alltagsfahrten, trotz Reichweitenverlustes wegen Klimatisierung, sowohl im Winter als auch im Sommer realisiert werden. Im Stadtverkehr wird mit einer geringeren Geschwindigkeit gefahren, deshalb können auch Fahrten mit relativ hohen Reichweiten erreicht werden. Der Betrieb von Elektroautos ist für höhere Geschwindigkeiten wie auf Landstraßen oder Autobahn eingeschränkt. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit wirkt der Luftwiderstand stark bremsend, wodurch die Reichweite zusätzlich eingeschränkt wird.

Daher besteht auch in Zukunft noch großer Forschungsbedarf um Elektroautos im Rahmen von niedrigen Temperaturen und hohen Geschwindigkeiten zu verbessern und die Alltags-tauglichkeit weiter zu verbessern.

Des Weiteren muss beachtet werden, dass sich diese Arbeit auf die zwei Einflussfaktoren Temperatur und Geschwindigkeit beschränkt hat. Demzufolge wurden andere Beeinträchtigungen der Reichweite vernachlässigt. Demnach bietet dieses Modell die Antwort für einen Teilaspekt bei der Beantwortung der Forschungsfrage. Interdisziplinär lässt sich dieses Modell physikalisch weiter ausbauen, um die Mitwirkungen weiterer Einflussfaktoren einzubeziehen.



Quellenverzeichnis

Ackermann, Jan; Brinkkötter, Claus; Priesel, Marc (2013): Neue Ansätze zur Klimatisierung von Elektrofahrzeugen, [online] https://www.iav.com/sites/default/files/atx_6_2013.pdf [14.02.2018].

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV) (2015): Gesetz zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge (Elektromobilitätsgesetz – EmoG), [online] <https://www.gesetze-im-internet.de/emog/EmoG.pdf> [04.02.2018].

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (o.J.): EU-Klimapolitik, [online] <https://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/eu-klimapolitik/> [24.01.2018].

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (o.J.): Elektromobilität in Deutschland, [online] <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html> [19.02.2018].

Füßel, Andreas (2017): Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität. Stand der Technik, Forschungsausblick und Projektion auf das Jahr 2025, Wiesbaden: Springer Verlag.

Geringer, Bernhard; Tober, Dr. Werner K. (2012): Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis: Kosten, Reichweite, Umwelt, Komfort, 2.Aufl., [online] http://www.xn--vk-eka.at/aktuelles/2012/Batterieelektrische_Fahrzeuge_in_der_Praxis_2.pdf [20.01.2018].

Joest, Stephan (2010): Von C15 bis Citroën C-Zero: alltagstaugliche E-Mobilität, [online] <https://amicale-citroen.de/tag/c25/> [22.01.2018].

Jung, Sandra (2014): Elektromobilität – Technologie mit Zukunft?, Diplomarbeit.

Jungblut, Sarah-Indra (2017): Ökobilanz E-Mobility: Auf die Stromquelle und die langfristige Nutzung der Batterie kommt es an, [online] <https://reset.org/blog/oekobilanz-e-mobility-die-stromquelle-und-die-langfristige-nutzung-der-batterie-kommt-es-022820> [18.01.2018].



Karle, Anton (2017): Elektromobilität: Grundlagen und Praxis, 2. Aufl., München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

Kiermasch, Cornelius (2013): Carsharing mit Elektroautos: Welches Mobilitätskonzept eignet sich für Großstädte?, Hamburg: disserta Verlag.

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2016): Deutsches Mobilitätspanel (MPO) Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen, Bericht 2015/2016: Alltagsmobilität und Fahrleistung, [online] https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_15_16.pdf [12.02.2018].

Kukuck, Horst-Albert (1996): The future of the electric vehicle: = Die Zukunft des Elektroautos, erschienen in Stromdiskussion, Frankfurt, Main.

Okhrin, Iryna (2015): Formelsammlung zu Vorlesungen „Statistik“, Induktive Statistik.

Öko-Institut e.V. (2017): Elektromobilität – Faktencheck, [online] https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FAQ_Elektromobilitaet_Oeko-Institut_2017.pdf [18.01.2018].

Peren, Franz W.; Sundermann, Nicola; Wittop, Beate (1997): Das Elektroauto und sein Markt, Frankfurt/Main, New York: Campus-Verlag.

Preuß, Rolf (2018): Joulesches Gesetz, [online] http://www.chemie.de/lexikon/Joulesches_Gesetz.html [16.02.2018].

Schmidt, Torsten (o.J.): Innenraumheizung per Wärmepumpe: Funktionsweise und Varianten, [online] <http://www.hochvoltkompetenz.de/details.html?content=41234&backlink=653&cHash=739dab570711da78f7e9290e359e24e9> [17.02.2018].

Schoblick, Robert (2013): Antriebe von Elektroautos in der Praxis: Motoren, Batterietechnik, Leistungstechnik. 1.Aufl., Haar bei München: Franzis Verlag.

Scrosati, Bruno; Garche, Jürgen; Tillmetz, Werner (2015): Advances in battery technologies for electric vehicles, Cambridge: Woodhead Publ.



Smuts, Martin; Scholtz, Brenda; Wesson, Janet (2017): A Critical Review of Factors Influencing the Remaining Driving Range of Electric Vehicles, in: Next Generation Computing Applications (NextComp), 2017 1st International Conference on.

Sommer, Marcel (2017): Fahrbericht Smart Fortwo Cabrio Electric Drive, [online] https://www.focus.de/auto/elektroauto/smart-fortwo-cabrio-electric-drive-der-dritte-stromer-im-bunde_id_7264850.html [14.02.2018].

Specht, Michael (2016): Batterie-Recycling. Das zweite Leben nach dem Elektroauto, [online] <http://www.zeit.de/mobilitaet/2016-11/batterie-recycling-elektroauto-speicher-stromnetz/komplettansicht> [18.01.2018].

Statista (2017a): Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektor im Jahr 2015 (in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent), [online] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/312450/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-quellgruppe/> [03.02.2018].

Statista (2017b): Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis 2017, [online] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/> [04.02.2018].

Statista (2017c): Anzahl der gemeldeten Pkw in Deutschland in den Jahren 1960 bis 2017 (Bestand in 1.000), [online] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12131/umfrage/pkw-bestand-in-deutschland/> [04.02.2018].

Statista (2018): Monatliche Durchschnittstemperatur in Deutschland von Januar 2017 bis Januar 2018, [online] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5564/umfrage/monatliche-durchschnittstemperatur-in-deutschland/> [15.02.2018].

Treiber, Martin; Kesting, Arne (2010): Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.



Walz, Joerg-Dieter (2015): Effiziente Heizung für Elektroautos, [online]
<https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2015/September/effiziente-heizung-fuer-elektroautos.html> [16.02.2018].



Erklärung zur Urheberschaft

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbst angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher noch keiner anderen Prüfbehörde vorgelegt und noch nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Dresden, den 20.02.2018

Bich Lien Nguyen