
Nutzen-Kosten-Analyse der Elektromobilität

VON HERBERT BAUM, JAN DOBBERSTEIN UND BASTIAN SCHULER, KÖLN

Inhalt

1. Notwendigkeit einer Nutzen-Kosten-Analyse der Elektromobilität
2. Analytischer Rahmen der Marktpotenzial- und Nutzen-Kosten-Berechnung
3. Entwicklungsszenarien für Elektrofahrzeuge in 2020
 - 3.1 Anschaffungsmehrkosten für Energiespeicher
 - 3.2 Betriebskostensparnisse von Elektrofahrzeugen
 - 3.3 Mobilitätsrestriktionen
4. Kritische Fahrleistung und Marktpotenzial
 - 4.1 Modellierung der Rahmenbedingungen
 - 4.2 Bestimmung der kritischen Fahrleistung
 - 4.3 Ermittlung der Stückzahlen
5. Nutzen-Kosten-Analyse der Elektromobilität
 - 5.1 Monetarisierung der Wirkungskomponenten
 - 5.2 Nutzen-Kosten-Verhältnis im „Best case“
 - 5.3 Nutzen-Kosten-Verhältnisse bei alternativen Szenarien
6. Abschätzung der Erfolgchancen durch Marktsimulation
7. Ergebnis

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Herbert Baum
Dipl.-Wirt. Ing. Jan Dobberstein, Dipl.-Kfm. Bastian Schuler
Institut für Verkehrswissenschaft
an der Universität zu Köln
Universitätsstr. 22
50923 Köln

1. Notwendigkeit einer Nutzen-Kosten-Analyse der Elektromobilität

Mit dem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität von 2009 wurde in Deutschland eine Förderstrategie für Elektrofahrzeuge eingeleitet. Zentrales Ziel ist es, im Jahr 2020 mindestens 1 Million Elektrofahrzeuge in Deutschland zu erreichen. Im Rahmen des Konjunkturpaketes II wurden 500 Millionen € bereitgestellt, um damit Forschung und Entwicklung, die Markteinführung und Marktverbreitung von elektrischen Fahrzeugen in Deutschland voranzubringen. Die Förderung von F und E konzentriert sich dabei auf die Entwicklung von marktreifen Energiespeichern und Antriebstechnik sowie eine intelligente System- und Netzintegration.

Die Frage ist, ob die eingeschlagene Förderungsstrategie erfolversprechend ist und ob die aufgewendeten Finanzmittel sinnvoll eingesetzt sind. Die Antwort darauf kann nur eine Analyse der sozioökonomischen Rentabilität der Elektrofahrzeuge liefern. Die Wirtschaftswissenschaften haben dazu mit der Nutzen-Kosten-Analyse ein Instrumentarium entwickelt, das zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit staatlicher Aktivitäten international anerkannt ist. In Deutschland sind derartige Nutzen-Kosten-Untersuchungen nach § 7 der Bundeshaushaltsordnung bzw. § 6 Haushaltsgrundsätzegesetz für Projekte von erheblicher finanzieller Bedeutung vorgeschrieben. Die Elektromobilität wurde damit bisher nicht untersucht. Auch in dem Forschungsbegleitprogramm des Umweltbundesamtes wird dieses Thema nicht aufgegriffen. Insofern besteht eine gravierende Kenntnislücke.

In der Nutzen-Kosten-Abwägung werden die Nutzen den Kosten der Elektromobilität gegenübergestellt. Die Nutzen bestehen aus Umweltentlastungen und Kraftstoffersparungen, die Mehrkosten aus der Technologie (Batterien) und Stromkosten. Die Elektromobilität ist gesamtwirtschaftlich-gesellschaftlich sinnvoll, wenn die Nutzen die Kosten übersteigen, also das Nutzen-Kosten-Verhältnis größer eins ist. Damit wird gewährleistet, dass die Anforderung der Bundesregierung – die Elektromobilität müsse sich wirtschaftlich selbst tragen – erfüllt wird. Eine Nutzen-Kosten-Analyse ist daher zur Bewertung unverzichtbar.

2. Analytischer Rahmen der Marktpotenzial- und Nutzen-Kosten-Berechnung

Die sozioökonomische Bewertung der Elektromobilität im Jahr 2020 geht in einem mehrstufigen Algorithmus vor (Abb. 1).



Abbildung 1: Analytischer Rahmen der Nutzen-Kosten-Abwägung; Quelle: eigene Darstellung

- (1) Zunächst werden Szenarien der Elektromobilität definiert, die als Rechnungsannahmen der Wirtschaftlichkeitsrechnung zugrunde gelegt werden. Damit wird das zukünftig zu erwartende Umfeld der Elektromobilität abgegrenzt. Es werden Annahmen getroffen u. a. über die Ölpreisentwicklung und Batteriekosten. Die Annahmen werden in einem realitätsnahen Ausprägungsintervall (min/max) getroffen, so dass das resultierende Erwartungsfeld die Entwicklungen der Elektromobilität bis 2020 abbildet.
- (2) Der zweite Schritt, der für die sozioökonomische Bewertung erforderlich ist, ist die Abschätzung des Marktpotenzials. Dieses wird theoretisch aus der Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen aus der Sicht der Endnutzer bestimmt. Dazu werden die Mehrkosten in der Anschaffung der Elektrofahrzeuge den Einsparungen im Betrieb gegen-

übergestellt. Der Marktanteil an den Neuzulassungen pro Jahr entspricht dann der Anzahl verkaufter Elektrofahrzeuge, für die sich unter den angenommenen Randbedingungen aufgrund einer rationalen Kostenabwägung der Umstieg auf ein Elektrofahrzeug lohnt.

Zur Ermittlung des Marktpotenzials wird mit einer Break-even-Analyse die „kritische Fahrleistung“ ermittelt. Die Kostenersparnis von Elektrofahrzeugen durch geringeren Kraftstoffverbrauch ist um so höher, je mehr dieses Fahrzeug pro Jahr fährt. Somit kann die jährliche Fahrleistung berechnet werden, bei der die jährliche Kraftstoffeinsparung für den Nutzer genau so hoch ist wie die jährliche Rate für das Abbezahlen der höheren Fahrzeugkosten (Batterie). Hat der Endnutzer eine höhere Fahrleistung, so ist das Elektrofahrzeug für ihn sinnvoll. Mit der Berechnung der kritischen Fahrleistung kann das Marktpotenzial für die einzelnen Jahre bestimmt werden und somit überprüft werden, ob das 1-Million-Ziel der Bundesregierung erreicht werden kann.

Bei der Berechnung der kritischen Fahrleistung werden die anvisierten Mehrkosten abzüglich der möglichen Kfz-Steuerersparnis durch die eingesparten Betriebskosten pro Kilometer dividiert. Für die jährlichen Mehrkosten eines Elektrofahrzeuges wird ein Ratenkredit aufgenommen. Die Annuitätsrate für den Endnutzer ergibt sich aus den Zinskonditionen (8 %) für den Ratenkredit. Sie beträgt 0,13.

$$\text{Jhrl. krit. Fahrleistung} = \frac{(\Delta \text{Kosten BEV} * 13\%) - \frac{\Delta \text{Kfz-Steuer}}{\text{Jahr}}}{\Delta \text{Betriebskosten pro Kilometer}} \quad (1)$$

Das Marktpotenzial ergibt sich aus einer detaillierten Analyse der Mobilitätsprofile der Verkehrsteilnehmer in Deutschland auf Basis der bundesweiten Mobilitäts-erhebung „Mobilität in Deutschland“, die eine Aufschlüsselung der jährlich bundesweit erbrachten Fahrleistungen u. a. nach demographischen Haushaltsmerkmalen, Ort der erbrachten Fahrleistung und Fahrleistungshöhe ermöglicht.

Die Restriktionen hinsichtlich Reichweite, Ladedauer und Lebensdauer, die sich für den Gebrauch von Elektrofahrzeugen ergeben, können damit durch eine Eingrenzung derjenigen verbleibenden Pkw-Besitzer abgebildet werden, deren Mobilität durch die Nutzung eines Elektrofahrzeugs nicht eingeschränkt wird.

- (3) Die Nutzen-Kosten-Analyse überprüft, ob die Nutzen von Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 höher sind als die Kosten. In diesem Fall liegt ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von größer eins vor. Die Ausstattung mit Elektrofahrzeugen ist dann gesamtwirtschaftlich sinnvoll. Die Nutzen bestehen aus eingesparten Umwelt- und Betriebskosten, die Kosten für Elektrofahrzeuge aus Batteriekosten und Infrastrukturkosten.

Zur Ermittlung der eingesparten Umwelt- und Betriebskosten wird ein Referenzfahrzeug zugrunde gelegt, d. h. ein durchschnittliches benzinbetriebenes Neufahrzeug. An Ausstattung und Sicherheit ändert sich nichts, nur der Antriebsstrang und der Energiespeicher werden modifiziert.

- (4) Im vierten Schritt wird untersucht, ob und gegebenenfalls in welcher Höhe staatliche Förderbeträge (u. a. Subventionen, Prämien, Steuernachlässe) aufgewendet werden müssen, um das Ziel von 1 Million Elektrofahrzeuge zu erreichen. Diese Frage stellt sich, wenn aufgrund ungünstiger Marktszenariobedingungen das 1 Million-Ziel verfehlt wird. Ausgehend von den Randbedingungen der Szenarien wird geprüft, welcher Förderbetrag rein rechnerisch erforderlich wäre, um die Anschaffungskosten der Fahrzeuge und deren kritische Fahrleistungen soweit künstlich zu senken, damit zusätzlich zu den entsprechend dem Marktmodell errechneten Stückzahlen ausreichend Fahrzeuge verkauft werden.

Dazu wird zunächst ein Referenzszenario definiert, das in 2020 gerade eine Million Elektrofahrzeuge verwirklicht. Davon werden die tatsächlichen Stückzahlen aufgrund des Marktkriteriums abgezogen, um die zusätzlich zu fördernden Stückzahlen zu bestimmen. Daraus wird berechnet, wie weit die kritische Fahrleistung zur Erreichung der gewünschten Stückzahl gesenkt werden muss. Die Senkung der kritischen Fahrleistung auf das gerade notwendige Niveau kann dann in einen Zuschuss pro Fahrzeug umgerechnet werden.

Bei der Abschätzung der Förderbeträge sind überdies Mitnahmeeffekte zu berücksichtigen. Diese ergeben sich daraus, dass auch Käufer, die sich ohnehin aufgrund des Kostenvorteils für ein Elektrofahrzeug entscheiden, von der monetären Förderung nochmals profitieren. Insofern enthalten die Förderbeträge verlorene Zuschüsse, die bei der Ermittlung der Gesamtfördersumme hinzugerechnet werden müssen. Eine marktfördernde Wirkung geht von den Mitnahmeeffekten nicht aus.

Für den Fall mit Subventionen zur Erreichung des 1 Million-Ziels wird das dann geltende Nutzen-Kosten-Verhältnis errechnet. Dabei ist zu prüfen, ob das Nutzen-Kosten-Verhältnis der zusätzlich geförderten Fahrzeuge aufgrund ihrer geringeren Durchschnittsfahrleistungen geringer ausfällt als ohne Subvention, wo nur das Marktkriterium die Kaufentscheidung bestimmt.

- (5) Als letzter Schritt wird die Frage untersucht, wie wahrscheinlich diejenigen Szenarien sind, die eine erfolgreiche Marktdurchdringung mit 1 Million verkaufter Elektrofahrzeuge erwarten lassen. Dazu wird ein Simulationsmodell (Monte-Carlo-Simulation) angewendet, in dem die Rahmenbedingungen der Szenarien als stochastisch verteilte Zufallsgrößen behandelt werden. Die Rahmenbedingungen sind alternative zufällige

Wertepaare von Ölpreis und Batteriekosten, die als normalverteilte Zufallsvariablen aufgefasst werden. Die Simulation ergibt die Streuung der Häufigkeit der Wertepaare von Ölpreis und Batteriekosten von 1.000 Szenarien. Aus der Streuung kann die Wahrscheinlichkeit abgeleitet werden, mit der hohe oder niedrige Extremwerte der Szenarien bzw. eine mittlere Entwicklung erwartet werden können. Die Durchrechnung der Szenarien zeigt, auf welchen Wert von Stückzahlen die Simulation zu-steuert und mit welcher Häufigkeit die Gesamtstückzahl von über 1 Million erreicht wird. Damit wird das numerische Erfolgspotenzial der Elektromobilität gekennzeichnet.

3. Entwicklungsszenarien für Elektrofahrzeuge in 2020

Die Modellierung der zukünftigen Entwicklung des Volumenmarktes für Elektrofahrzeuge zwischen 2015 bis 2020 erfolgt durch die Ermittlung von kritischen Fahrleistungen, die den Mehraufwand für Hochleistungsbatterien mit den Kosten von konventionellen Kraftstoffen vergleichen. Die Kosten für Antrieb und Energiespeicher von Elektrofahrzeugen sind aktuell noch zu hoch für eine allein kostenrationale Kaufentscheidung für ein Elektrofahrzeug anstatt eines Benzinfahrzeugs. Bis 2020 werden jedoch ein Lernkurveneffekt und damit wesentliche Kostensenkungen erwartet, so dass ein Volumenmarkt entstehen kann und in größerer Zahl Elektrofahrzeuge auf den Markt kommen. Da der Kauf von Elektrofahrzeugen die Substitution von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren bedeutet, wird ein Vergleich hinsichtlich Komponenten, Verbrauch und Mobilitätseignung vorgenommen. Die zukünftigen Umweltwirkungen stehen unter dem Einfluss der Vorgaben der Politik, die ehrgeizige Klimaschutzziele vorsehen, um Klima- und Umweltschäden zu reduzieren und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu lockern.

- Mehrkosten in der Anschaffung: Der Rückgang der Batteriekosten bis 2020 wird durch unterschiedliche mögliche Verlaufsszenarien abgebildet, da die Batteriekosten einen hohen Anteil an den Kosten für das Gesamtfahrzeug (mehr als 60 %) ausmachen.
- Kosteneinsparungspotenziale von Elektrofahrzeugen: Der Kraftstoffpreis und –verbrauch konventioneller Antriebe hat einen großen Einfluss, da diese etablierte und günstige Lösung den gemeinsamen Automobilmarkt bisher uneingeschränkt dominiert. Dieser Abhängigkeit wird durch die Bildung verschiedener Ölpreisszenarien Rechnung getragen.
- Marktpotenzialanalyse: Aus Mobilitätskennwerten wie Fahrleistung, Zweitwagenquote, Stellplatzverfügbarkeit und Verkehrsanteil im Nahbereich können

potenzielle Nutzergruppen identifiziert werden, die abhängig von den geltenden Marktpreisen und ihrer individuellen Fahrleistung ein Elektrofahrzeug erwerben.

- Bewertung der Umweltwirkungen: Der Wandel des Energiemix hin zur verstärkten Nutzung emissionsarmer und erneuerbarer Energien und die zukünftigen Emissionsgrenzwerte für Pkw werden einbezogen, um die voraussichtlichen Umweltwirkungen zu bestimmen.

Diese Entwicklungen sind aufgrund ihres Gewichts in der Bewertung zentral. Für sie können quantitative Erwartungsmodelle abgeleitet werden, die für den Betrachtungszeitraum (2015-2020) zueinander konsistente Rechnungsannahmen liefern.

3.1 Anschaffungsmehrkosten für Energiespeicher

Die ermittelten Mehrkosten in der Anschaffung geben vor, in welcher Höhe Einsparungen erzielt werden müssen, um diese Kosten aufzuwiegen. Somit hängen die kritischen Fahrleistungen, die zur Amortisierung gerade erzielt werden müssen („Break even“), maßgeblich von den zusätzlichen Kosten ab.

Der Energiespeicher bestimmt die Reichweite und technische Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge wie auch die Kosten der Elektromobilität. Die Li-Ion-Technologie, die in den ersten am Markt verfügbaren Modellen eingesetzt wird, basiert auf Akkus von Notebooks und Mobiltelefonen, die bislang vorrangig in Asien entwickelt und produziert werden. Der Nachteil von elektrischen Energiespeichern allgemein ist die verglichen mit fossilen Energieträgern geringe gravimetrische Energiedichte² bei hohen Kosten, so dass für den Straßenverkehr geeignete Batterien in heutigen Modellen mindestens 20.000 € Mehrkosten im Vergleich zum Kraftstofftank eines Benzinfahrzeugs ausmachen. In zukünftigen Batterien soll durch die Verwendung von widerstandsfähigeren Materialien wie Lithium-Eisen-Phosphat- (LiFePO₄) oder Titanat-Legierungen eine konkurrenzfähige Ladegeschwindigkeit über eine Lebensdauer von 12 Jahren gewährleistet werden. Bis 2020 wird so eine Zyklenlebensdauer von ca. 2.500 Tiefentladungszyklen erwartet, so dass das Elektrofahrzeug dem Nutzer für eine Gesamtfahrleistung von bis zu 300.000 km zur Verfügung steht.³

Neben den technischen Eigenschaften sind die Kosten pro kWh das Merkmal der Energiespeicher, das die kritische Fahrleistung prägt. Aktuell belaufen sich die Kosten auf etwa 700-1000 €/kWh. Als Ausgangswert für die Berechnung der Kosten für die Batterie in 2020

² Fossile Energieträger, wie z. B. Benzin, sind mit einer Energiedichte von 12.000 Wh/kg elektrischen Energiespeichern deutlich überlegen. Vgl. Späth et al. (2010).

³ Vgl. Axsen et al. (2008), Kalhammer et al. (2007), Kromer & Heywood (2007), Rosenkranz (2009), Scrosati & Garche (2010),

eignen sich die Differenzpreise der ersten in Deutschland verfügbaren Elektrofahrzeuge: Für eine Batterie mit 16 kWh sind aktuell 20.000 € Mehrpreis zu erwarten, so dass sich abzüglich Herstellermarge und Mehrwertsteuer ein Nettoherstellerepreis von 750 €/ kWh als Ausgangswert ergibt.

Die Kostenentwicklung bis 2020 wird in unterschiedlichen Studien ähnlich als degressiver Kostenverlauf prognostiziert: Kalhammer et al. beschreiben die künftigen Batteriekosten in Abhängigkeit von der Fertigungsmenge und der Batteriekapazität. Bei Massenproduktion belaufen sich die geschätzten Kosten im besten Fall auf etwa 210 €/kWh. BCG erwartet im besten Fall eine konservativere Preisreduktion auf etwa 290 €/kWh. In der Studie von McKinsey wird bei einer aggressiven Preisreduktion ein Preis von etwa 240 €/kWh im Jahr 2020 angenommen.⁴ Diese günstigen Werte können durch eine jährliche Kostenabnahme von maximal 10 % abgebildet werden.

Die Bundesregierung verweist in einer aktuellen Antwort auf eine Anfrage im Bundestag auf die Preisentwicklung seit 1998 von durchschnittlich 8 % Preisrückgang pro Jahr, die auch in Zukunft für Fahrzeugbatterien erreicht werden soll - das würde in 2020 Batteriekosten von ca. 330 €/ kWh bedeuten⁵.

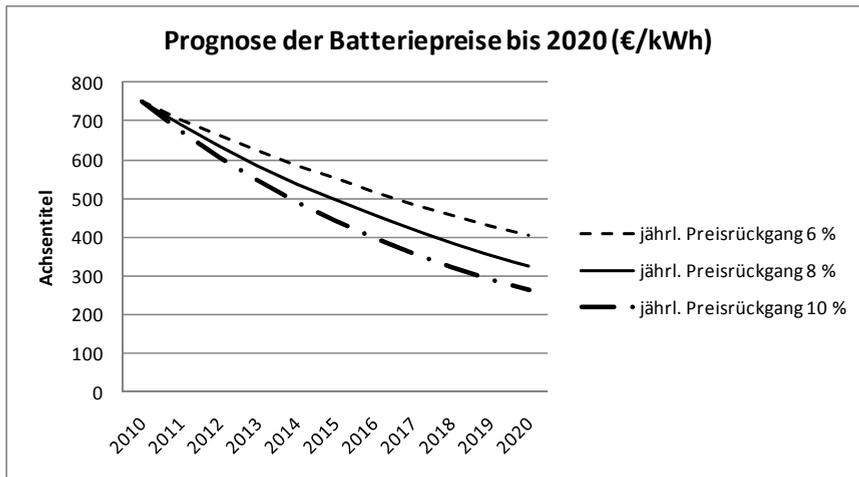


Abbildung 2: Prognose der Kostenverläufe für Batterien zwischen 2010 und 2020; Quelle: eig. Berechnungen. basierend auf BCG (2009). McKinsey (2009). Bundesregierung (2010)

⁴ Vgl. BCG (2009), Kalhammer et al. (2007), McKinsey (2009), Wietschel & Bünger (2010)

⁵ Vgl. Bundestag (2010): Antwort der Bundesregierung auf die Große Anfrage zur Technologieführerschaft Deutschlands; BCG (2009) enthält denselben Wert.

Im Fall einer moderaten Preisreduktion ermitteln die Studien von McKinsey und BCG Werte von 355-364 €/kWh. Bei einer weniger starken oder stagnierenden Senkung der Batteriekosten, z: B. durch unerwartete Schwierigkeiten bei der Massenproduktion, sind in ungünstigen Szenarien auch Verläufe denkbar, die bei durchschnittlich 6 % jährlicher Kostenreduktion in 2020 in Batteriekosten von etwa 400 €/kWh resultieren.

Da die Preisentwicklung von globalen Entwicklungsfortschritten und dem massiven Aufbau von Produktionskapazitäten abhängt, muss der Batteriepreis in 2020 als zentraler Rechnungsparameter in einem realistischen, ausreichend großen Intervall abgebildet werden. Aufbauend auf den bisherigen Prognosen wird mit hoher Sicherheit eine jährliche Kostenabnahme zwischen 6 und 10 % erreicht. Der zeitliche Verlauf der Kosten pro kWh im zugehörigen Zeitraum ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Endkundenpreise liegen aufgrund des branchenüblichen Preisaufschlags für Zulieferteile etwa 40 Prozent höher als die OEM-Preise und erfahren einen Faktor 1,4.⁶ Die Endkundenpreise enthalten somit anteilig die zusätzlich zur Herstellung anfallenden Kosten für Garantie, Entwicklung, Kapazitätserweiterungen sowie Marketing und Vertrieb. Zusätzlich muss der Marktpreis noch die Mehrwertsteuer von 19 Prozent berücksichtigen. Dadurch ergeben sich rechnerische Mehrkosten für die Batterie in 2020 zwischen 6.970 und 16.152 €, je nach Kostenrückgang und Batteriegröße.

Um die gesamten Mehrkosten pro substituiertem Fahrzeug zu bestimmen, sind neben der Batterie weitere Modifikationen im Antriebsstrang sowie die Schaffung einer Lademöglichkeit zu berücksichtigen. Die Kosten, die durch einen „virtuellen Umbau“ eines konventionellen Fahrzeugs entstehen bzw. wegfallen, sind in Tabelle 1 dargestellt⁷.

Fahrzeugtyp		Benzin-Fhzg	BEV	City-BEV
Ottomotor mit Kupplung	[€]	-	-3315	-3315
Kraftstofftank	[€]	-	-179	-179
Konventioneller Starter	[€]	-	-431	-431
Elektromotor inkl. Steuerung	[€]	-	2876	2876
Batteriegröße	in kWh	-	24	16
Batteriekosten	[€]	-	10456-16152	6970-10768
Infrastruktur				
Ladestation	[€]	-	200	200
Summe Mehrkosten	€	-	9607-15303	6122-9920

Tabelle 1: Prognose der Kostenunterschiede zwischen Benzin- und E-Fahrzeugen in 2020
 Quelle: eigene Berechnungen bzw. Wietschel / Bünger (2010) S.92, Wietschel et al. (2009))

⁶ Vgl. BCG (2009)

⁷ Vgl. Wietschel & Bünger (2009)

Es ergeben sich Einsparungen am Antriebsstrang des Referenzfahrzeugs (Motor, Tank), da ein Elektroantrieb weniger aufwendig ist, die Batteriekosten übertreffen jedoch diesen Einsparungseffekt deutlich.

In der Kraftfahrzeugsteuer werden die Fahrzeuge unterschiedlich behandelt. Fahrzeuge werden nach Hubraum und Kohlendioxidausstoß besteuert. Pro 100 ccm fallen 2 € Sockelbetrag an. Zusätzlich müssen pro Gramm CO₂/km, das emittiert wird, Zusatzabgaben in Höhe von 2 Euro pro Gramm gezahlt werden, wenn der ab 2014 gültige Grenzwert von 95 g CO₂/km überschritten wird. Elektrofahrzeuge sind in den ersten fünf Jahren komplett von der Steuer befreit. Danach werden sie auf Basis des zulässigen Gesamtgewichts besteuert.⁸ Für das benzinbetriebene Referenzfahrzeug gilt für das Jahr 2020 ein CO₂-Ausstoß von 130 g CO₂/km. Der Sockelbetrag wird mit 24 € pro Jahr angenommen.⁹ Bei dem Benzinfahrzeug fallen durch die Überschreitung des zulässigen Grenzwertes zusätzliche Steuern in Höhe von 70 € an. Für das Batteriefahrzeug wird ein Gesamtgewicht von 2000 kg angenommen. In den ersten fünf Jahren fällt keine Kfz-Steuer an. Danach müssen jährlich 56 € gezahlt werden. Nach aktuellem System fällt somit im Zeitraum 2015-2020 eine durchschnittliche jährliche Kfz-Steuer von 33 € an.

3.2 Betriebskostensparnisse von Elektrofahrzeugen

Die ermittelten Mehrkosten in der Anschaffung geben vor, in welcher Höhe Einsparungen erzielt werden müssen, um diese Kosten aufzuwiegen. Somit hängen die kritischen Fahrleistungen, die zur Amortisierung gerade erzielt werden müssen („Break even“), maßgeblich von den zusätzlichen Kosten ab.

Für die Prognose der Ersparnisse, die Elektrofahrzeuge durch geringere Betriebskosten dem Pkw-Besitzer bieten, sind Kraftstoffpreis und -verbrauch des Ottomotors die zentralen Referenzgrößen, die die fahrleistungsabhängigen Einsparungen und damit die kritische Fahrleistung beeinflussen.

Als Referenzfahrzeug dient ein in Verbrauch und Kosten durchschnittliches Neufahrzeug (Ottomotor), wie z. B. der VW Golf 1,4 TSI mit 90 kW, dessen gegenwärtige Kosten und Eigenschaften auf 2020 projiziert werden. In 2010 lag der CO₂-Ausstoß eines durchschnittlichen benzinbetriebenen Neufahrzeugs bei 153,2 g CO₂/km. Dieser Wert entspricht einem Benzinverbrauch von etwa 6,5 l/100 km.¹⁰

Die EU hat 2009 eine Verordnung zur Minderung der CO₂-Emissionen bei Neufahrzeugen verabschiedet. Danach soll ein durchschnittliches Neufahrzeug eines Herstellers bis 2012

⁸ Vgl. ADAC (2010a), ADAC (2010b)

⁹ Für das Benzinfahrzeug wurde eine Hubraumreduzierung von 200ccm aufgrund von Downsizing angenommen.

¹⁰ Vgl. DAT (2010), ADAC Autokatalog (2010), KBA (2010)

maximal 130 g CO₂/km ausstoßen. Im Jahr 2012 müssen zunächst 65 Prozent der Neuwagenflotte eines jeden Herstellers die Norm erfüllen, ein Jahr später 75 Prozent, 2014 dann 80 Prozent und ab 2015 schließlich alle Neuwagen.¹¹

Ab 2020 liegt der Grenzwert bei 95 g/km, wobei dieser Wert nicht als maßgeblich für die Bewertung gesehen werden kann. Denn zum einen soll die Norm bis 2013 noch einmal überprüft werden, zum anderen können Pkw mit einem CO₂-Ausstoß von unter 50 g CO₂/km bis ins Jahr 2015 mehrfach angerechnet werden. Speziell die deutsche Automobilwirtschaft fordert eine Verlängerung dieser Regelung bis ins Jahr 2020, so dass diese rechnerisch verzerrte Grenze nicht als Maßstab für die Ermittlung der Nettoeffekte dienen kann.

Der anvisierte Wert von maximal 130 g CO₂/km hingegen kann mit hoher Sicherheit durch Einsparungen u. a. durch Verbrennungsoptimierung, Downsizing, Aluminiumkarosserie und neue Brennverfahren realisiert werden. Für den zukünftigen Verbrauch konventioneller Antriebe im Jahr 2020 kann damit der Grenzwert von 130 g CO₂/km angenommen werden, da der CO₂-Ausstoß direkt vom Kraftstoffverbrauch abhängt – bei der Verbrennung von einem Liter Benzin entstehen 2370 g CO₂. Somit beträgt der durchschnittliche Verbrauch von benzinbetriebenen Antrieben ab dem Jahr 2015 im Durchschnitt 5,5 l/100 km.¹²

Der Ölpreis im Jahr 2020 ist aufgrund der starken Korrelation von Öl- und Benzinpreis der Modellparameter, anhand dessen die Kraftstoffpreise abgebildet werden. Da es für das Jahr 2020 keine Prognosen bezüglich des Benzinpreises in Deutschland gibt, werden die Kraftstoffpreise aus Marktdaten des Rohölmarkts abgeleitet. Das Bild, das sich beim Ölpreis bietet, ist uneinheitlich:

- Der Ölpreisverlauf der Jahre 2000–2010 weist einen in hohem Maße unregelmäßigen, aber in der Summe positiven Trend auf. Durch Spekulationen wurde im Jahr 2008 ein Maximum von 140 \$/ Barrel erreicht, seit dem Einbruch im Zusammenhang mit der Weltwirtschaftskrise 2009 hat er sich bei durchschnittlich 80-90 \$/Barrel eingependelt – mit steigender Tendenz.¹³
- Die Bundesregierung geht für 2020 in anderen Zusammenhängen von 100 \$/ Barrel Rohöl aus, was angesichts der Schätzungen, dass der „peak oil“-Punkt schon erreicht wurde, sehr optimistisch scheint. Die Internationale Energie Agentur (IEA) entwirft im World Energy Outlook ebenfalls Szenarien, die 2009

¹¹ Vgl. u. a. UBA Österreich (2010)

¹² 5,5 l/km entsprechen einem CO₂-Ausstoß von 130 g/km, vgl. KBA (2009)

¹³ Shell (2010); Tescon (2010)

eine moderate Steigung bis zu 100 \$/ Barrel und im Update von 2010 eine mittlere Preissteigerung auf 108 \$/Barrel prognostizieren¹⁴

Angesichts der hohen Schwankungsbreite der Vergangenheitswerte und der Unklarheit über den Verlauf weiterer Verknappungen der verbleibenden Ressourcen ist kein erwartungstreuer Fixpunkt für 2020 in der Ölpreisentwicklung anzusetzen. Deswegen deckt ein Zielpreis zwischen 100 und 130 \$/Barrel einen Großteil der zu erwartenden Preisentwicklungsszenarien ab. Analog zu diesen Ölpreisen sind Benzinpreise zwischen 1,66 €/l und 2,16 €/l in 2020 abbildbar.

Fahrzeugtyp		Benzin-Fhzg.	Elektro-Fhzg.
Kraftstoffverbrauch und –kosten			
Benzinpreis	[€/l]	1,66 – 2,16	-
Kraftstoffverbrauch	[l/100 km]	5,5	-
Kraftstoffkosten	[€/km]	0,091 – 0,119	-
Stromverbrauch und –kosten			
Strompreis	[€/kWh]	-	0,22
Stromverbrauch	[kWh/km]	-	0,135
Stromkosten	[€/km]	-	0,0397
Kosten für Wartung und Instandhaltung			
Ölwechsel mit Ölfilter	[€/km]	0,007	-
Luftfilter	[€/km]	0,001	-
Zündkerzen	[€/km]	0,002	-
Wartungskosten E-Fhzg.	[€/km]	-	~0,005
Wechsel Bremsflüssigkeit	[€/km]	0,002	0,002
Wechsel Bremsbeläge	[€/km]	0,006	0,006
Reifen inkl. Montage	[€/km]	0,01	0,01
Summe Wartung+Instandhaltung	[€/km]	0,028	0,023
Summe Betriebskosten	[€/km]	0,119 – 0,147	0,063

Tabelle 2: Prognose der Kostenunterschiede zwischen Benzin- und E-Fahrzeugen in 2020
 Quelle: eigene Berechnungen bzw. Wietschel / Büniger (2010) S.92, Wietschel et al. (2009))

Die Betriebskostensparnisse basieren also im Wesentlichen auf den in Zukunft hohen Kosten für Kraftstoff, der durch günstigere elektrische Energie ersetzt wird. Aber der

¹⁴ IEA (2009); Businessweek (2010)

Ottomotor ist auch wartungs- und pflegeintensiver als ein Elektromotor (siehe Tabelle 2), so dass zusätzlich 0,01 €/km Kostenunterschied entstehen. Da jedoch noch keine Erfahrungswerte bezüglich der Wartung und Pflege von Elektrofahrzeugen bestehen, gehen die Ersparnisse an Wartungskosten als vorsichtige Schätzung zu 50 % mit 0,005 €/km in die Bewertung ein.

Die Berechnung der kritischen Fahrleistung vergleicht also auf Grundlage der jährlichen Marktbedingungen (aktueller Händlerpreis für Elektrofahrzeuge & aktuelle Benzinpreise) in Form der jährlichen Fahrleistung die Kosten, die ein Elektrofahrzeug mehr kostet als ein konventionelles Fahrzeug mit den voraussichtlichen Ersparnissen, die über die Lebensdauer durch die günstigere Nutzung von Strom statt Benzin entstehen. Tabelle 3 zeigt im Gesamtüberblick die ermittelten Rechnungsparameter, aus denen die im Zeitverlauf bis 2020 abnehmende kritische Fahrleistung berechnet wird. Der Strompreis für den Endkunden beträgt dabei konstant 22 ct/kWh, die Ladeinfrastruktur 200 €/Fhgz.¹⁵

Fahrzeugtyp		Benz.-Fhgz.	BEV	City-BEV
Technische Daten				
	[l/km]	0,055	-	-
	[kWh/km]	-	0,135	0,135
Verbrauchskosten				
Benzinpreis	[€/l]	1,66 – 2,16	-	-
Strompreis	[€/kWh]		0,22	0,22
Verbrauchskosten	[€/km]	0,091 – 0,119	0,0297	0,0297
Wartung und Instandhaltung				
Summe Wart.+Instandhalt.	[€/km]	0,028	0,023	0,023
Summe Betriebskosten	[€/km]	0,119 – 0,147	0,063	0,063
Steuern				
Kfz-Steuern	[€/Jahr]	94	33	33
Anschaffungskosten				
Batteriegröße	in kWh	-	24	16
Batteriekosten	[€/Fhgz.]	-	10456-16152	6970-10768
Einsparungen Antrieb	[€/Fhgz.]	-	-1049	-1049
Infrastrukturkosten	[€/Fhgz.]	-	200	200
Summe Mehrkosten	[€/Fhgz.]	-	9607-15303	6122-9920
annuisierte Mehrkosten	[€/Jahr]	-	1249-1989	796-1290

Tabelle 3: Gesamtüberblick der Endverbraucherpreise (2020) für die Marktpotenzialanalyse; Quelle: eig. Berechn., u. a. basierend auf Wietschel & Bünger (2010), IEA (2010), BCG (2009)

¹⁵ Vgl. Kapitel 3.3 bzw. 5.2

3.3 Mobilitätsrestriktionen

Die ermittelte kritische Fahrleistung wird mit der Fahrleistung verschiedener Fahrzeughaltergruppen verglichen, um den erreichbaren Marktanteil abzuschätzen. Diese Mobilitätsprofile verkörpern die Restriktionen, die von einem Elektrofahrzeug ausgehen. Falls die kritische Fahrleistung die Fahrleistung einer Gruppe unterschreitet, kann dieser Anteil den potenziellen Käufern von Elektrofahrzeugen zugerechnet werden.

Um die annähernde Anzahl Pkw zu quantifizieren, müssen neben den wirtschaftlichen Aspekten weitere Restriktionen von Elektrofahrzeugen berücksichtigt werden¹⁶:

1. Jedes Elektrofahrzeug benötigt einen privaten Stellplatz am Wohnort des Nutzers.
2. Aufgrund der begrenzten Reichweite eignen sich Elektrofahrzeuge nur als Zweitwagen.
3. Technische Restriktionen der Batterie schränken die maximale Fahrleistung eines Elektrofahrzeugs ein.

Die Restriktion eines privaten Stellplatzes ist wichtig, da das Betanken der Elektrofahrzeuge in 2020 nahezu ausschließlich mit privaten und halb-öffentlichen Ladestationen erfolgen wird. Einer der Hauptgründe liegt darin, dass öffentliche Ladestationen oder Batteriewechsel-Stationen sehr hohe Investitionen erfordern und aufgrund der erwarteten geringen Marktdurchdringung bis 2020 wirtschaftlich nicht rentabel sind.¹⁷

Bei der Verfügbarkeit der privaten Stellplätze werden Garagen und ein privater Stellplatz am Wohnort berücksichtigt. Gerade in ländlichen Kreisen lässt sich diese Form der Infrastruktur gut realisieren. So haben 80 % der Fahrzeughalter in ländlichen Kreisen die Möglichkeit, ihr Fahrzeug auf einem privaten Stellplatz zu parken.

In verdichteten Kreisen ist die Versorgung mit einem privaten Stellplatz ebenfalls kein Problem. 70 % der Haushalte in verdichteten Kreisen parken ihr Fahrzeug auf einem privaten Stellplatz. In Kernstädten werden Fahrzeuge hingegen häufig an der Straße abgestellt, wo in der Regel keine direkte Anschlussmöglichkeit an das Stromnetz besteht.¹⁸ Daher steht in städtischen Gebieten nur für 47 % der Fahrzeughalter ein privater Stellplatz zur Verfügung.¹⁹

¹⁶ Vgl. Biere et al. (2009)

¹⁷ Vgl. Kley (2009b)

¹⁸ ländliche Kreise = Kreise/Kreisregionen mit einer Dichte unter 150 Ew./km², verdichtete Kreise = Kreise mit einer Dichte über 150 Ew./km², Kernstädte = Kreisfreie Städte über 100.000 Ew.; vgl. BMVBS (2009)

¹⁹ Vgl. BMVBS (2009): MiD 2008 u. a. Tabellenband

Berücksichtigt man, dass jeweils 25 % aller zugelassenen Fahrzeuge auf ländliche Kreise und Kernstädte und 50 % auf verdichtete Kreise entfallen, dann verfügen insgesamt etwa 70 % aller Fahrzeughalter über die Möglichkeit, ihr Fahrzeug an einem privaten Stromanschluss zu laden. Erste Feldtests bestätigen diese Schätzungen und kommen in Abhängigkeit der gewählten Batteriekapazität auf Werte von 60-80 %.²⁰ Private Ladestationen können also einfach und kostengünstig installiert werden. Die Investitionskosten in Höhe von 200 € werden von Staat und Energiewirtschaft an den Kunden weitergegeben.

Die zweite Restriktion bei der Bestimmung des Marktpotenzials ist, dass Elektrofahrzeuge sich nur als Zweitwagen eignen. Man kann von einer Reichweite von ca. 130 km pro Batterieladung ausgehen. Da die Mehrkosten und das Gewicht eines Elektrofahrzeugs deutlich mit der Größe der Batterie steigen, sind größere Entfernungen pro Tag nur bei Schnellladevorgängen möglich. Die Verbreitung der notwendigen Hochleistungsanschlüsse ist jedoch gering. Zwar reicht die gewählte Reichweite für die durchschnittliche Wegstrecke von 39 km pro Tag aus, jedoch müssen auch längere Freizeit- und Urlaubsfahrten berücksichtigt werden. Im Schnitt geht jeder Deutsche 1,4 mal pro Jahr auf Reisen. Dabei haben 72 % aller Reisen eine Distanz von mehr als 155 km. Selbst bei langen Strecken von bis zu 1.000 Kilometern bleibt das Auto mit Abstand das wichtigste Reisemittel.²¹ Auch wenn Verkehrsmittel wie Bahn, Flugzeug oder auch Car-Sharing zur Verfügung stehen, ist nicht zu erwarten, dass die Nutzer eine Einschränkung der Reichweite für ihren Erstwagen akzeptieren²².

Daher wird angenommen, dass Elektrofahrzeuge nur für Haushalte, die einen Zweitwagen besitzen, eine Alternative sind. Insgesamt besitzen 29 Prozent aller Haushalte in Deutschland zwei oder mehr Fahrzeuge.²³

Die dritte Restriktion betrifft die technischen Gegebenheiten der Batterien. Bei der Batterie des Referenzfahrzeugs wird davon ausgegangen, dass durch neue Materialien und ein verbessertes Batteriemanagement eine kalendarische Lebensdauer von 12 Jahren erreicht werden kann, was etwa 2000–3000 Tiefenentladungszyklen entspricht. Dadurch hätte die Batterie des Referenzfahrzeugs eine theoretische Laufleistung von etwa 300.000 km.²⁴ Verteilt auf die Lebensdauer von 12 Jahren ergibt sich eine maximale jährliche Fahrleistung von 25.000 km. Dies entspricht in etwa einer durchschnittlichen Tagesstrecke von 68 km.

²⁰ Vgl. Kley et al. (2010)

²¹ Vgl. BMVBS (2009); MiD 2008; Hautzinger et al. (2005)

²² Vgl. Umfragen zur Akzeptanz von Elektrofhzg. durch accenture (2009), ADAC (2009), TÜV (2010)

²³ Vgl. BMVBS (2009); MiD 2008

²⁴ Bei 2500 Tiefenentladungszyklen und einer Reichweite von 130 km pro Ladezyklus

Zusammengefasst definieren die Restriktionen einen Faktor, der angewendet auf die Fahrleistungsintervalle deutscher Fahrzeughalter, den Anteil am Automobilgesamtmarkt beschreibt, den Elektrofahrzeuge annehmen können.²⁵

- Durch die technische Restriktion der Batterien fällt der Anteil der Fahrer, die mehr als 25.000 km pro Jahr fahren (12 % der Fahrzeughalter), komplett weg.
- Die Bedingung eines eigenen Stellplatzes (70 %) und die Zweitwagenquote (29 %) ergeben zusammen einen Anteil von 20,2 %.
- Demnach erfüllen 20,2 % der verbleibenden 88 % der Fahrzeughalter alle Bedingungen, die der uneingeschränkte Betrieb eines Elektrofahrzeugs stellt.

Berücksichtigt man diese Restriktionen gemeinsam, summiert sich das Gesamtpotenzial von Elektrofahrzeugen aus den einzelnen Fahrleistungssegmenten zu einem Anteil von 17,7 % an allen PKW in Deutschland (Tabelle 4).

Jährl. Fahrleistung [km]	0-5000	5000 - 10000	10000 - 15000	15000 - 20000	20000 - 25000	25000 - 50000	m. als 50000	Σ
Alle Fahrzeughalter/Neuzulassungen [%]	10,6	26,2	25,9	15,5	9,9	9,5	2,5	100
Fahrzeughalter (verbleibend unter Restriktionen) [%]	2,1	5,3	5,2	3,1	2	-	-	17,7

Tabelle 4: Marktpotenzial der Elektromobilität: Fahreranteile nach Fahrleistung; Quelle: eig. Berechnungen basierend u. a. auf MiD 2008

Diese Analyse der Fahrzeughalter und der zugehörigen erbrachten Fahrleistung filtert anhand der Restriktionen potenzielle Käufer von Elektrofahrzeugen aus der Gesamtheit aller Fahrzeugkäufer heraus, so dass die ermittelte kritische Fahrleistung mit der Fahrleistung der einzelnen in Tabelle 4 aufgeschlüsselten Fahrergruppen verglichen werden kann.

Dieser Vergleich ergibt eine realistische Abschätzung, welchen Anteil Elektrofahrzeuge an den jährlichen Neuzulassungen einnehmen, wenn die potenziellen Käufer sich aufgrund des Vergleichs der zu erwartenden Kostenersparnisse mit den geltenden Anschaffungskosten für ein Elektrofahrzeug entscheiden. Aufsummiert über die Jahre 2015-2020 bilden diese neuzugelassenen Elektrofahrzeuge die Gesamtzahl der im deutschen Straßenverkehr eingesetzten Elektrofahrzeuge.

²⁵ Die Restriktionen verteilen sich gleichmäßig über die unterschiedlichen Fahrprofile..

4. Kritische Fahrleistung und Marktpotenzial

Beispielhaft wird anhand des Szenarios mit den günstigsten Bedingungen für eine Marktentwicklung („best case“) die Umsetzung der Methodik und der Rechnungsannahmen in den Abschätzungen dargestellt. Als exogene Zielgrößen für die Berechnung werden dazu der maximal erwartbare Ölpreis in 2020 von 130 \$/Barrel sowie der maximale Kostenrückgang für die Batterien von 10 % pro Jahr angenommen. Die Berechnung der Zwischenergebnisse und Effekte für das Jahr 2015 werden detailliert vorgestellt, die weiteren Ergebnisse für die Jahre bis 2020 skizziert, so dass anhand des vollständigen Szenarios nachvollzogen werden kann, wie die Berechnung des Marktpotenzials und die Nutzen-Kosten-Abwägung aufeinander aufbauen.

4.1 Modellierung der Rahmenbedingungen

Für die betrachteten Jahre 2015 bis 2020 ergeben sich damit die in Tabelle 5 dargestellten günstigsten Entwicklungspfade der variablen Eingangsgrößen, die einen starken Rückgang der Batteriekosten sowie einen deutlichen Anstieg des Benzinpreises ausdrücken. Für jedes Jahr geben diese Parameter zunehmend günstigere Marktbedingungen vor, da die Kaufhürde – der hohe Mehrpreis für die Batterie – geringer wird, während der Betriebskostenvorteil wächst und den Anreiz zum Wechsel erhöht. So wären für einen Fahrer mit einer Fahrleistung von 15.000 km pro Jahr die Mehrkosten zu den Konditionen im Jahr 2020 in ca. 4 Jahren zu amortisieren.

Szenarioparameter	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Benzinpreis inkl. St (€)	1,74	1,83	1,91	1,99	2,07	2,16
OEM-Bat.pr. (€ pro kWh)	442,9	398,6	358,7	322,8	290,6	261,5

Tabelle 5: Szenario-Inputwerte für einen Ölpreis in 2020 von 130 \$/Barrel und einen jährl. Rückgang der Batteriekosten von -10 % (Quelle: eigene Berechnungen)

4.2 Bestimmung der kritischen Fahrleistung

Zunächst ist die Entscheidungssituation der potenziellen Neuwagenkäufer im Jahr 2015 abzubilden. Für potenzielle Käufer beider Modellvarianten gelten die im Jahr des Neuwagenkaufs erwarteten Werte für Kosten und Ersparnisse als Entscheidungsgrundlage. Lohnt sich die Mehrausgabe verglichen mit den fahrleistungsabhängigen Einsparungen?

Die Mehrkosten für die Veränderungen am Fahrzeug im Jahr 2015 sind der OEM-Batteriepreis multipliziert mit der Anzahl kWh (Batteriegröße), zuzüglich der Herstellermarge von 40 % sowie der Mehrwertsteuer von 19 %, abzüglich der Ein-

sparungen gegenüber dem konventionellen Antriebsstrang in Höhe von 849 € (Tabelle 3). Für das City-BEV mit einer Batteriekapazität von 16 kWh ergeben sich so für den Endkunden Mehrkosten in der Anschaffung in Höhe von 10.955 €. Analog kostet das größere BEV mit 24 kWh 16.858 € mehr als das Referenzfahrzeug. Um diese Kosten mit der jährlichen Betriebskostensparnis zu vergleichen, werden sie mit der ermittelten Annuitätsrate von 0,13 multipliziert, so dass sich jährliche Mehrkosten von 1.424 € bzw. 2.192 € ergeben.

Die Kraftstoff- und Wartungskostensparnis pro km ist für City-BEV wie BEV gleich. Die Benzinkosten pro km belaufen sich auf 9,59 €ct, die Wartungskostensparnis beträgt 0,5 €ct/km. Abzüglich der Stromkosten pro km in Höhe von 2,97 €ct ergeben diese Werte ein Kostendelta von 7,11 €ct/km in 2015.

Eingesetzt in Formel (1) – Mehrkosten geteilt durch Kostensparnis pro km - beträgt die kritische Fahrleistung in 2015 für das City-BEV 19.156 km und für das größere BEV 29.939 km. Durch das jährlich größere Kostendelta zwischen Benzin- und Stromkosten und die geringeren Batteriepreise sinken diese kritischen Fahrleistungen stark. Abbildung 3 zeigt, wie die Fahrleistung, die benötigt wird, um die Mehrkosten für die Batterie zu egalieren, bis 2020 auf 7.818 bzw. 12.639 km fällt.

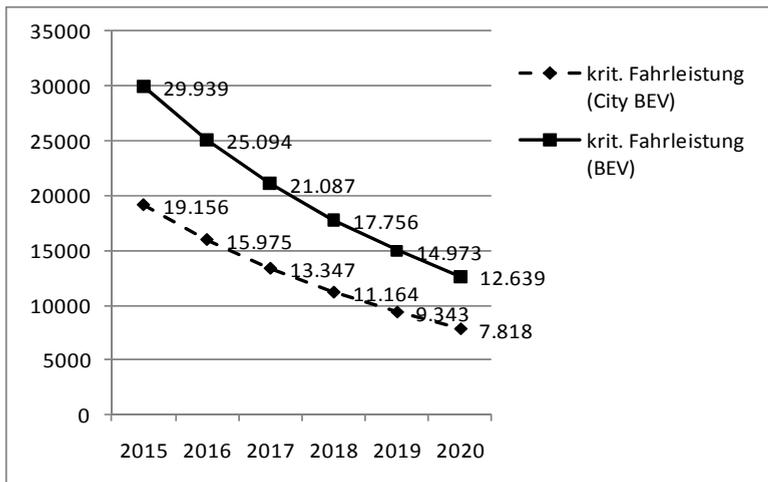


Abbildung 3: Entwicklung der kritischen Fahrleistung zwischen 2015 und 2020 am Beispiel des „best-case“ Szenarios; Quelle: eig. Berechnungen

4.3 Ermittlung der Stückzahlen

Die kritische Fahrleistung für das BEV liegt mit 29.939 km/Jahr oberhalb der maximal möglichen Jahresfahrleistung von 25.000 km, so dass in 2015 kein BEV verkauft wird.

Das City-BEV hingegen werden alle identifizierten Fahrzeughalter wählen, die mehr als 20.000 km im Jahr fahren und die Eigenschaften des Elektrofahrzeugs nicht als restriktiv empfinden, sowie zusätzlich auch anteilig diejenigen, die zwischen 15.000 und 20.000 km im Jahr fahren. Unter der Annahme, dass die Fahrer gemäß ihrer Fahrleistung innerhalb einer Gruppe gleichmäßig verteilt sind, ist der Anteil proportional zum Abstand zwischen kritischer Fahrleistung und Intervallgrenze, so dass der Marktanteil innerhalb dieses Intervalls interpoliert wird:

$$\text{Marktanteil 2015 (City-BEV)} = 2\% + 3,1\% * (20.000 - 19,156)/(20.000 - 15.000) = 2,52\%$$

Tabelle 6 zeigt für die Folgejahre, welche theoretischen Marktanteile sich für die sinkende kritische Fahrleistung ergeben. Nun ist abzubilden, wie sich die überschneidenden Marktpotenziale im Zeitverlauf auf die verschiedenen Varianten verteilen.

Theoretisches Marktpotenzial für City BEV in % (Batterie: 16 kWh - niedrige Reichweite/Fahrleistung)							
Fahrleistung	Ges.pot	2015	2016	2017	2018	2019	2020
0 - 5.000 km	2.1 %	0	0	0	0	0	0
5.000 - 10.000 km	5.3 %	0	0	0	0	0,70	2,31
10.000 - 15.000 km	5.2 %	0	0	1,72	3,99	5,20	5,20
15.000 - 20.000 km	3.1 %	0,52	2,50	3,10	3,10	3,10	3,10
20.000 - 25.000 km	2,0 %	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
errechn. Ant. an Neuzulassungen [%]		2,52	4,50	6,82	9,09	11,00	12,61

Theoretisches Marktpotenzial für BEV in % (Batterie: 24 kWh - hohe Reichweite/Fahrleistung)							
Fahrleistung	Ges.pot	2015	2016	2017	2018	2019	2020
0 - 5.000 km	2.1 %	0	0	0	0	0	0
5.000 - 10.000 km	5.3 %	0	0	0	0	0	0
10.000 - 15.000 km	5.2 %	0	0	0	0	0,03	2,46
15.000 - 20.000 km	3.1 %	0	0	0	1,39	3,10	3,10
20.000 - 25.000 km	2,0 %	0	0	1,57	2,00	2,00	2,00
errechn. Ant. an Neuzulassungen [%]		0,00	0,00	1,57	3,39	5,13	7,56

Tabelle 6: Theoretische Marktanteile für City-BEV und BEV im „Best case“ Szenario; Quelle: eig. Berechnungen

Die Modellierung der Kaufentscheidung „City-BEV vs. BEV“ nimmt an, dass 50 % aller potenziellen Kunden mit hohen Fahrleistungen („frühe Wechsler“), für die das geeignetere BEV mit der größeren Batterie in den frühen Stadien des Volumenmarkts zu teuer ist, das City-BEV kaufen. Zusätzlich kaufen die Kunden mit niedrigeren Fahrleistungen als

15.000 km immer das günstigere City-BEV, während Kunden mit hohen Fahrleistungen das BEV bevorzugen, sofern es nicht unrentabel ist.

In der Analyse der passenden Mobilitätsprofile wurde gezeigt, dass hohe Jahresfahrleistungen auch längere Einzelstrecken bedeuten, so dass für Fahrer zwischen 15.000 und 25.000 km/Jahr das BEV mit der größeren Batterie das geeignete Fahrzeug ist. Für die identifizierten Kunden stellt das City-BEV deswegen nur die zweitbeste Lösung dar, da sie zwar die kritische Fahrleistung übertreffen und sich der Wechsel lohnt, aber eine größere Reichweite bevorzugen. Ein Teil dieser Fahrer („frühe Wechsler“) wird trotzdem bereit sein, das kleinere Fahrzeug zu kaufen, da sich der Kauf finanziell lohnt. Selbst die maximale elektrische Fahrleistung von 25.000 km/Jahr gleichverteilt auf 200 Werktage bedeutet eine Tagesstrecke von nur 125 km, was auch das City-BEV zu leisten imstande ist. Darum werden neben den Kunden, die das ideal für sie geeignete BEV oder City-BEV kaufen, auch 50 % der potenziellen Kunden mit hohen Fahrleistungen, für die das BEV mit der größeren Batterie in den frühen Stadien des Volumenmarkts noch zu teuer ist, das City-BEV kaufen (Tabelle 7).

Der für 2015 ermittelte Marktanteil von 2,52 % für das City-BEV liegt in diesem Fahrleistungsbereich der „frühen Wechsler“. D. h. im Jahr 2015 sind $0,5 * 2,52 = 1,26$ % aller Neuwagenkäufer Käufer des City-BEV. In 2016 trifft das für $0,5 * 4,5 \% = 2,25$ % der Käufer zu.

			2015	2016	2017	2018	2019	2020
City BEV	"Wenigfahrer" 0 - 15.000 km/Jahr	[%]	0,00	0,00	1,72	3,99	5,90	7,51
City BEV	"frühe Wechsler": 15.000 - 25.000 km/J.	[%]	$(2,52 - 0)/2$ = 1,26	$(4,5 - 0)/2$ = 2,25	$(5,1 - 1,57)/2$ = 1,76	$(5,1 - 3,99)/2$ = 0,86	$(5,1 - 5,1)/2$ = 0	0
BEV	"Vielfahrer" 15.000 - 25.000 km/J	[%]	0,00	0,00	1,57	3,39	5,10	5,10
Summe (Ant. an Neuzulassungen)		[%]	1,26	2,25	5,05	8,24	11,00	12,61

**Tabelle 7: Verteilung des Marktanteils auf City-BEV und BEV im „Best case“ Szenario;
Quelle: eig. Berechnungen**

Sobald die kritische Fahrleistung im Jahr 2017 für das BEV marktfähig wird und unter 25.000 km sinkt, werden nun 1,57 % das BEV wählen. Also werden 1,57 % der Käufer durch das BEV bedient, für die verbleibenden $5,1 - 1,57 = 3,52$ % gilt wie in 2015 und 2016: die Hälfte dieser verbleibenden Fahrer entscheidet sich für das City-BEV – das sind 1,76 %. In der Summe kaufen also $1,72 + 1,76 = 3,98$ % das City-BEV, weitere 1,57 % das BEV, so dass in 2017 ein Marktanteil von insgesamt 5,05 % für Elektrofahrzeuge errechnet wird.

Bezogen auf 3,5 Mio. Neuzulassungen²⁶ ergeben sich aus den Marktanteilen Stückzahlen von 44.153 im Jahr 2015, im Jahr 2016 sind es 78.669 allein für das City-BEV. Im Jahr 2017 kauften 54.777 Kunden das BEV, während 122.037 City-BEV verkauft werden.

Tabelle 8 zeigt, wie die Marktanteile in den Fahrleistungssegmenten und die dazugehörigen Stückzahlen zwischen 2015 und 2020 ansteigen.

Resultierender Marktanteil von Elektrofahrzeugen an Neuzulassungen								
			2015	2016	2017	2018	2019	2020
City BEV	"Wenigfahrer"	[%]	0,00	0,00	1,72	3,99	5,90	7,51
	"frühe Wechsler"	[%]	1,26	2,25	1,76	0,86	0,00	0,00
BEV	"Vielfahrer"	[%]	0,00	0,00	1,57	3,39	5,10	5,10
Summe			1,26	2,25	5,05	8,24	11,00	12,61

Verkaufte Stückzahlen [pro Jahr]		2015	2016	2017	2018	2019	2020
City BEV		44.153	78.669	122.037	169.530	206.372	262.951
BEV		0	0	54.777	118.700	178.500	178.500
Summe		44.153	78.669	176.814	288.230	384.872	441.451

Summe aller Elektrofahrzeuge bis 2020: 1.414.190

Tabelle 8: Übersicht über das Marktpotenzial für der Elektr.-Fhgz. 2015-2020 („best-case“)
Quelle: eig. Berechnungen

Da gemäß den Annahmen die Batteriekosten sinken und die Benzinpreise steigen, sinkt die kritische Fahrleistung, so dass jedes Jahr ein größerer Marktanteil erreicht werden kann. In diesem „best case“ Szenario erreichen die beiden Modellvarianten zusammen bis zu 12,6 % Marktanteil an den Neuzulassungen im Jahr 2020.

5. Nutzen-Kosten-Analyse der Elektromobilität

5.1. Monetarisierung der Wirkungskomponenten

In der Nutzen-Kosten-Analyse sind die Nutzen aus eingesparten Betriebskosten von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Benzinfahrzeugen sowie die eingesparten Umweltkosten (CO₂, NO_x, Lärm) anzusetzen. Diese Nutzen sind den höheren Systemkosten (u. a. Batterie, Infrastruktur) gegenüberzustellen.

Die Betriebskostenunterschiede werden in der Marktpotenzialanalyse herausgearbeitet. Während dort mit den Bruttokosten für den Verbraucher gerechnet wird, sind in der Nutzen-Kosten-Analyse die Nettopreise bzw. die Nettokostensätze anzusetzen, d. h. ohne

²⁶ Vgl. KBA (2009): Die durchschnittlich verkaufte Stückzahl in Deutschland beträgt 3,5 Mio. PKW.

Steuern, die nur einen finanziellen Transfer darstellen und keine allokativen Wirkungen haben. Für die Nutzen-Kosten-Analyse sind neben den Betriebskosten auch die Umweltkosten von Elektrofahrzeugen und die Kostenunterschiede zwischen Benzin-Fahrzeug und BEV relevant. Zu den Umweltkosten zählen die CO₂-Kosten, die Kosten anderer Schadstoffe und die Lärmkosten des Verkehrs. Die Ermittlung der CO₂-Effekte wirft die Frage auf, welche Emissionen im Zusammenhang mit der Erzeugung des im Verkehr verbrauchten Stroms entstehen. Zwar fordert die Bundesregierung eine ausschließliche Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien, jedoch ist davon auszugehen, dass sich die Emissionswerte und Strompreise für den Betrieb von Elektrofahrzeugen an den Werten des Gesamt-Energiemix orientieren.

Wenn z. B. RWE für die angekündigte Kleinserie von Elektrofahrzeugen beabsichtigt, nur Strom aus erneuerbaren Energien bereitzustellen²⁷, kann diese Annahme nicht ohne Weiteres in die sozioökonomische Bewertung übernommen werden, da diese Zuordnung nur eine Verteilung innerhalb des modellierten Gesamtsystems bilden würde. Die Emissionseinsparungen aufseiten des Stromangebots können nicht selektiv einem Nachfrageträger zugeordnet werden.

Das bedeutet, dass für jede Verbrauchseinheit innerhalb dieses Systems der gleiche CO₂-Wert des prognostizierten, durchschnittlichen Energiemix angesetzt werden muss, um einen Nettoeffekt abzubilden. Diese Prognose schließt ein, dass sich der Anteil alternativer, nahezu emissionsneutraler Energien von heute 14 Prozent auf 30 Prozent im Jahre 2020 fast verdoppeln soll²⁸. Die Emissionen pro kWh im prognostizierten Energiemix können damit von 533 auf 330 g CO₂/ km gesenkt werden, so dass sich bei einem Verbrauch von 0,135 kWh/km²⁹ ein indirekter CO₂-Wert von 45 g CO₂/ km für die Emissionen von Elektrofahrzeugen ergibt.

Als Nettostrompreise werden Großhandelsstrompreise angesetzt, die sich aus den Beschaffungskosten und den Netzentgelten zusammensetzen. Zur Ermittlung der Endverbraucherpreise müssen zusätzliche Komponenten wie Konzessionsabgabe, Stromsteuer, EEG- und KWK-Umlage, Vertriebskosten und Mehrwertsteuer berücksichtigt werden. Der Abgabenanteil liegt mit etwa 40 Prozent deutlich unter dem Steueranteil von Benzin.³⁰

Die beschlossene Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke³¹ bedeutet Brennstoff- und CO₂-Zertifikateinsparungen, so dass die Strompreise nur moderat ansteigen. Der Nettostrompreis wird aufgrund der zukünftig höheren Anteile von erneuerbaren Energien sowie

²⁷ Vgl. RWE (2010)

²⁸ Vgl. BMU (2008b)

²⁹ Für Elektromotoren wird der Nennverbrauch heutiger Modelle als konstanter Verbrauchswert gesetzt.

³⁰ Vgl. BDEW (2010) & JURIS (2010) bzgl. KWK-G, EEG etc.

³¹ Bundesregierung (2010)

Kernkraft am Energiemix vom Ölpreis entkoppelt und mit konstant 12 ct/kWh angesetzt. Inklusive der Besteuerung auf Strom ergeben sich somit 22 ct/kWh als Endverbraucherpreis.³²

Die Netto-Betriebskostensätze sind in Tabelle 9 dargestellt.

Fahrzeugtyp		Benzin-Fhzg.	BEV	City-BEV
Nutzen				
Betriebskosten				
Technische Daten				
	[l/km]	0,055	-	-
	[kWh/km]	-	0,135	0,135
Benzinkosten	[€/l]	0,74-1,16	-	-
Stromkosten	[€/kWh]	-	0,12	0,12
Verbrauchskosten	[€/km]	0,041 – 0,064	0,016	0,016
Wartung+Instandhaltung	[€/km]	0,028	0,023	0,023
Summe Betriebskosten	[€/km]	0,069 – 0,092	0,039	0,039
Umweltkosten				
CO ₂ , NO _x , Lärm	[€/km]	1,63	0,37	0,37
Kosten				
Batteriekosten				
Batteriegröße	in kWh	-	24	16
Batteriekosten	[€/Fhzg.]		6276-9695	4184-6463
Einsparungen Antrieb	[€/Fhzg.]		-735	-735
Infrastrukturkosten	[€/Fhzg.]		200	200
gesamte Mehrkosten	[€/Fhzg.]	-	3649-5928	5741-9160
annuisierte Mehrkosten	[€/Jahr]		365-593	575-916

Tabelle 9: Netto-Kostensätze für die Nutzen-Kosten-Analyse von Elektromobilität

Quelle: eigene Darstellung basierend u. a. auf UBA (2007), CE Delft (2008)

³² Vgl. BDI (2010),

Für die Bestimmung der CO₂-Kosten gilt, dass Elektrofahrzeuge mit dem prognostizierten Energiemix in Deutschland betrieben werden und dadurch einen indirekten CO₂-Ausstoß von 45 g CO₂/km haben. Die Kosten für eine Tonne CO₂-Emissionen für das Jahr 2020 orientieren sich an den Empfehlungen des Umweltbundesamtes und werden mit 70 €/t CO₂ angesetzt.³³ Da das Jahr 2007 die Basis für die Schätzung ist, wird der Wert mit 2 Prozent Inflation für das Jahr 2010 fortgeschrieben. Somit ergibt sich ein Wert von etwa 74 €/t CO₂ (Tabelle 10).

Neben den CO₂-Emissionen werden durch den Straßenverkehr weitere Schadstoffe ausgestoßen. Dazu zählen z.B. Stickstoffmonoxid (NO), Schwefeldioxid (SO₂) oder Feinstaub PM10. Die Kosten der Luftverschmutzung betragen fortgeschrieben für 2010 0,12 €/km.

Für die Lärmkosten von konventionellen Fahrzeugen wird ein Durchschnittswert von 0,23 €/km (Basisjahr 2004) angenommen, es ergibt sich ein Wert von 0,25 €/km für das Jahr 2010. Dieser Wert wurde gemäß den Fahrleistungsanteilen der substituierten Fahrzeuge aus den Kostensätzen für Fahrten, die tagsüber auf Straßen inner- bzw. außerorts stattfinden, ermittelt³⁴. Für die Batteriefahrzeuge werden keine Lärmkosten angenommen, da der Elektromotor fast lautlos arbeitet. Dieser Vorteil muss unter Vorbehalt gesehen werden, da die Geräuscharmheit von Elektrofahrzeugen zu einer erhöhten Unfallgefahr führen könnte. Das würde die positiv bewertete Lärmreduzierung einschränken, fließt aber in diese Analyse nicht quantitativ ein.

Fahrzeugtyp		Benzin-Fzg.	BEV
CO ₂ -Emissionen	[g/km]	130	45
CO ₂ -Kosten	[€/t CO ₂]	74	
	[€/km]	0,962	0,333
Emissionskosten (NO _x , PM)	[€/km]	0,12	-
Lärmkosten	[€/km]	0,25	-
Summe Umweltkosten	[€/km]	1,312	0,333
Eingesparte Umweltkosten	[€/km]	1,3	

Tabelle 10: Umweltkostensätze der zu vergleichenden Fahrzeuge (2010); Quelle: u. a. UBA (2007) S.49, CE Delft. (2008) S.69, eigene Berechnung

Für die Marktpotenzialanalyse werden Preise verwendet, die die Bruttokosten für den Endverbraucher abbilden, da der einzelne Nutzer seine Kaufentscheidung im rationalen Entscheidungsmodell anhand der für ihn geltenden, vollständigen Kosten trifft. Die Nutzen-Kosten-Analyse hingegen weist die gleichen Betriebskosten in Nettopreisen zur Analyse

³³ UBA (2007)

³⁴ Vgl. CE Delft (2008)

der gesamtwirtschaftlichen Effekte aus. Dafür gehen in die Nutzen-Kosten-Abwägung zusätzlich zu den Betriebskostensparnissen auch die beschriebenen externen Umwelteffekte ein.

5.2 Nutzen-Kosten-Verhältnis im „Best case“

Zur Berechnung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses (NKV) wird der Mit-Fall (Ausstattung mit Elektrofahrzeugen) – die errechnete Stückzahl und die Fahrleistung – mit dem Ohne-Fall (Benzin-Referenzfahrzeug) – dieselbe Stückzahl und Fahrleistung – gegenübergestellt. Die Stückzahlen werden ermittelt aus dem Vergleich von kritischer Fahrleistung und tatsächlicher Fahrleistung (siehe Kapitel 4.3).

Die dort ausgewiesenen Stückzahlen können den zugehörigen Fahrleistungsintervallen zugeordnet werden, woraus sich die Fahrleistung der Elektrofahrzeuge ergibt. Für das Bespieljahr 2015 im Fahrleistungssegment 20.000-25.000 km/Jahr heißt das, dass die errechneten 44.149 Elektrofahrzeuge eine Fahrleistung gemäß ihrer Fahrleistungssegment (15.000-20.000 km/Jahr bzw. 20.000-25.000 km/Jahr) erbringen. Für 2015 ergeben sich $35.000 \text{ Fz} * 22.500 \text{ km/Jahr} + 9.149 \text{ Fz} * 17.500 \text{ km/Jahr} = (787,5 + 160,1) \text{ Mio Fz km}$ (Tabelle 11).

		2015	2016	2017	2018	2019	2020	Gesamt
Fahrleistung [Mio km]	5.000 - 10.000 km/Jahr	0	0	0	0	183	790	973
	10.000 - 15.000 km/Jahr	0	0	752	2.497	4.772	7.047	15.069
	15.000 - 20.000 km/Jahr	160	924	1.874	3.249	5.148	7.047	18.402
	20.000 - 25.000 km/Jahr	788	1.575	2.979	4.554	6.129	7.704	23.727
	Gesamt	948	2.499	5.604	10.300	16.232	22.587	58.011
Stückzahlen	City-BEV	44.149	78.665	122.030	169.525	206.365	262.945	883.681
	BEV	0	0	54.771	118.693	178.500	178.500	530.464
	Gesamt	44.149	78.665	176.801	288.218	384.865	441.445	1.414.143
Nutzen [in Mio €]	Einsparung Betriebskosten	32	94	231	465	795	1.192	2.808
	Einsparung Umweltkosten	9	24	55	101	159	221	569
	Gesamt	41	118	286	566	953	1.414	3.378
Kosten [in Mio €]	Mehraufwand Batterie	31	82	200	380	601	824	2.119
	Nutzen-Kosten-Verhältnis	1,309	1,443	1,434	1,489	1,586	1,715	1,594

Tabelle 11: Nutzen-Kosten-Analyse - Übersicht über bewertete Effekte der bis 2020 verkauften Elektrofahrzeuge im Szenario „best case“; Quelle: eig. Berechnungen

Die Kosten der verkauften Elektrofahrzeuge werden mit dem annuisierten volkswirtschaftlichen Mehraufwand für die Batterie angesetzt. Die fahrleistungsabhängigen Ressourcensparnisse in Form von eingesparten Kraftfahrzeugbetriebs- und Umweltkosten werden

mit den Werten für jedes Jahr angesetzt. Zusätzlich zum jahresweiten Entwicklungspfad wird die Summe über alle Wirkungen bis 2020 ausgewiesen. Dazu werden die jahresbezogenen Nutzen- und Kostenwerte der einzelnen Jahre 2015 bis 2020 aufsummiert.

Auf der Nutzenseite ergibt sich für 2015 für 44.153 Elektrofahrzeuge eine zu bewertende Fahrleistung von 948 Mio. Fz km, die mit dem Ohne-Fall – Fahrleistung mit konventionellen Antrieben – verglichen wird. Unter Verwendung der in Tabelle 9 ermittelten Kostensätze ergeben sich aus den Ressourceneinsparungen für diese Fahrleistung Nutzen in Höhe von 41,12 Mio. €, wovon 9,28 Mio. € (22,56 %) aus verminderten Umweltwirkungen und 31,85 Mio. € (77,44 %) aus Betriebskosteneinsparungen stammen.

Für Elektrofahrzeuge in 2015 im betrachteten Best case-Szenario stehen auf der Kostenseite Mehraufwände in Höhe von insgesamt 31,42 Mio. € entgegen. Das entspricht den annuisierten, anteiligen Mehrausgaben für Entwicklung, Produktion, und Einbau der Batterien. Es ergibt sich damit ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von 1,31, so dass die Substitution von Benzinfahrzeugen durch Elektrofahrzeuge aus volkswirtschaftlicher Sicht positiv zu bewerten ist.

Tabelle 11 zeigt, wie die Fahrleistung und die Stückzahlen bis 2020 steigen und sich die davon abhängigen bewerteten gesamtwirtschaftlichen Wirkungen entwickeln.

Für die Jahre 2015 bis 2020 steigen durch die überproportionale Zunahme der verkauften Stückzahlen die Nutzen stärker als die Kosten, so dass das Nutzen-Kosten-Verhältnis in 2020 auf 1,7 ansteigt. Über die gesamte Markthochlaufphase 2015-2020 ergibt sich als gewogener Durchschnitt ein NKV von 1,6. Der gesamte Überschuss der Nutzen über die Kosten beträgt 1,2 Mrd. €, womit im „Best case“ eine beachtliche volkswirtschaftliche Rentabilität der Elektromobilität signalisiert wird.

Ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von 1,6 bedeutet, dass jeder €, der in die Elektromobilität investiert wird, einen Nutzen von 1,60 € erzeugt. Von der absoluten Größenordnung her ist dies ein Ergebnis, das die Wirtschaftlichkeitsschwelle überschreitet, aber nicht besonders herausragend ist. In der internationalen Evaluierungsliteratur wird ein NKV zwischen 1 und 3 als akzeptabel eingestuft.

In diesem „Best case“-Szenario wird das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen aufgrund der günstigen Marktbedingungen klar erreicht. So erzielen beide Modelle zusammen im Jahr 2020 einen Marktanteil von 12,61 % der Neuzulassungen. Das BEV erreicht dabei sein volles Marktpotenzial im Vielfahrersegment. Das City-BEV setzt sich im Kleinwagenmarkt durch, der Kauf würde sich bereits ab einer Fahrleistung von 7.800 km/Jahr lohnen.

Die Jahre 2015 bis 2020 beschreiben die Markthochlaufphase, so dass erst nach einer vollständigen Flottenerneuerung in 10 bis 15 Jahren ein stabiler Anteil von Elektrofahrzeugen am Gesamtmarkt erreicht wird. Eine Weiterentwicklung des Szenarios bis 2030 bei konstant guten Bedingungen zeigt, dass langfristig ca. 5 Millionen Elektrofahrzeuge 12,6 % der Gesamtflotte ausmachen würden. Daraus ergäben sich jährliche Nutzen von 5 Mrd. €, denen jährliche Mehrkosten von 2,1 Mrd. € gegenüber ständen.

Zu beachten ist aber auch, wie sich der Markteintritt des teureren BEV im Jahr 2017 auf das NKV auswirkt. Da in diesem Jahr nur leichte Zugewinne an Fahrleistung, aber hohe zusätzliche Mehrkosten für teurere Batterien entstehen, weist diese Stagnation in der Entwicklung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses auf ein Risiko bei der Marktdurchdringung hin. Die im BEV verwendeten größeren Batterien bedeuten zwar eine höhere Laufzeit und Fahrleistung je Ladezyklus, die damit verbundenen Mehrkosten erzeugen aber einen deutlich höheren Ressourcenverbrauch als zusätzliche City-BEV. Dadurch wird erneut deutlich, wie entscheidend Größe und Preis der Batterie für die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen sind.

Trotzdem zeigt dieses „Boom-Szenario“ beispielhaft, wie durch exogenen Kostendruck und optimale Rahmenbedingungen ein funktionierender Markt für Elektromobilität entstünde und somit aus allein wirtschaftlichen Gesichtspunkten ein erfolgreicher Umstieg in eine emissionsarme, nachhaltige Mobilität möglich wäre.

5.3 Nutzen-Kosten-Verhältnisse bei alternativen Szenarien

In dem dargestellten „Best case“ – Szenario werden ausschließlich aus dem Wirtschaftlichkeitskalkül der Fahrzeugkäufer die Millionengrenze deutlich überschritten und hohe Stückzahlen von Elektrofahrzeugen erreicht. Fraglich ist, ob bei alternativen, ungünstigeren Szenarien die volkswirtschaftliche Rentabilität gewahrt bleibt.

Für niedrigere Kraftstoffpreise und Verzögerungen im Batteriefortschritt bleibt das Elektrofahrzeug bis 2020 für viele Autofahrer unwirtschaftlich. Das bedeutet, dass das Ziel von einer Million Elektrofahrzeuge bis 2020 aufgrund der mangelnden Marktdurchdringung infolge der ungünstigeren Randbedingungen deutlich verfehlt wird. Das NKV berechnet auch für diese alternativen Szenarien – wie oben ausgeführt – welche gesamtwirtschaftlichen Wirkungen mit der Verbreitung von Elektrofahrzeugen im Zeitraum bis 2020 verbunden sind. Die zukünftige Marktdurchdringung wird durch einen Vergleich der kritischen Fahrleistung mit den Fahrleistungsprofilen der Pkw-Fahrer in Deutschland bestimmt. Damit können potenzielle Kunden identifiziert werden. Es werden nur Fahrzeuge und zugehörige Fahrleistungen betrachtet, die aufgrund einer rationalen Amortisationsüberlegung der Käufer im Straßenverkehr vertreten sind.

In ungünstigen Szenarien müssen Fahrleistungen, die mit Elektrofahrzeugen erbracht werden, sehr hoch sein, um den Autofahrer zum Kauf eines Elektrofahrzeugs zu bewegen und einen ausreichenden Nutzen zu generieren. Nur wenn die Fahrer auch eine entsprechend hohe Fahrleistung substituieren, sind die Wirkungen der Elektromobilität gesamtwirtschaftlich positiv.

Im Folgenden werden sechs Szenarien (Tabelle 12) betrachtet, die mit einer gezielten Variation der Parameter Benzinpreis und Batteriepreis das Feld möglicher Ergebnisse abdecken. Ausgewiesen werden für jedes Szenario die Marktentwicklung (Stückzahl, Jahresfahrleistungen), die Nutzen-Kosten-Differenz und das Nutzen-Kosten-Verhältnis. Mit fortschreitender Szenarienreihenfolge werden die Bedingungen für die Elektromobilität fortgesetzt ungünstiger.

Szenario	1 - "++/++"				2 - "+/+"				3 - "o/+"							
	Ölpreis 2020				125 \$/ Barrel				115 \$/ Barrel							
	jährl. Bat.pr.entw.				- 10%/Jahr				- 9%/Jahr							
	Stck.	JFL	Nutzen	Kosten	Stck.	JFL	Nutzen	Kosten	Stck.	JFL	Nutzen	Kosten				
2015	44.153	0,948	41,1	31,4	27.600	0,621	25,8	20,8	17.139	0,386	14,5	12,9				
2016	78.669	2,499	118,1	81,8	58.088	1,813	81,4	60,5	42.354	1,302	52,5	41,9				
2017	176.814	5,604	286,2	199,6	94.766	3,684	178,3	124,3	72.211	2,741	117,9	86,9				
2018	288.230	10,300	565,6	379,9	195.996	7,073	366,6	253,4	135.291	5,229	239,0	173,5				
2019	384.872	16,232	953,5	601,4	295.494	11,871	656,4	437,7	232.428	9,137	442,1	314,8				
2020	441.451	22,587	1413,5	824,4	382.061	17,775	1044,2	658,6	324.152	14,335	732,1	499,8				
Gesamt	1.414.190	58,170	3378,0	2118,5	1.054.005	42,837	2352,6	1555,4	823.574	33,129	1598,1	1129,8				
Szenariobewertung	Nutzen-Kosten-Diff. [in Mio €]				1.260				797				468			
	Nutzen-Kosten-Verhältnis				1,59				1,51				1,41			

Szenario	4 - "o/o"				5 - "-/o"				6 - "-/-"							
	Ölpreis 2020				105 \$/ Barrel				100 \$/ Barrel							
	jährl. Bat.pr.entw.				- 8%/Jahr				- 6%/Jahr							
	Stck.	JFL	Nutzen	Kosten	Stck.	JFL	Nutzen	Kosten	Stck.	JFL	Nutzen	Kosten				
2015	7.225	0,163	6,1	5,7	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0				
2016	29.374	0,823	33,2	27,2	16.514	0,372	13,3	12,1	0	0	0,0	0,0				
2017	55.826	1,975	85,0	64,8	36.333	1,182	44,5	36,5	1.609	0,036	1,3	1,3				
2018	83.062	3,613	165,1	117,2	62.619	2,453	97,1	75,2	17.884	0,439	16,0	14,4				
2019	160.247	6,471	313,1	221,8	91.062	4,249	176,2	130,1	32.586	1,172	44,6	36,9				
2020	247.476	10,593	541,0	375,6	170.741	7,257	314,9	232,8	51.867	2,254	89,2	70,6				
Gesamt	583.209	23,638	1143,5	812,3	377.269	15,513	646,0	486,7	103.946	3,901	151,0	123,2				
Szenariobewertung	Nutzen-Kosten-Diff. [in Mio €]				331				159				28			
	Nutzen-Kosten-Verhältnis				1,41				1,33				1,23			

Tabelle 12: Nutzen-Kosten-Bewertung von Elektrofahrzeugen bei verschiedenen Szenarien; JFL = gesamte mit Elektrofahrzeugen erbrachte Fahrleistung in Mio Fz km, Nutzen u. Kosten in Mio. €; Quelle: eig. Berechnungen

- Szenario 1 entspricht dem detailliert in Abschnitt 5.2 vorgestellten Fall mit den günstigsten Bedingungen, d. h. der maximalen Benzinpreissteigerung und der maximalen Batteriepreissenkung. Allein aufgrund dieser Marktbedingungen wird die

maximale Stückzahl von 1,4 Mio. Elektrofahrzeugen, eine Nutzen-Kosten-Differenz von 1,2 Mrd. € und ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von 1,6 erreicht.

- Szenario 2 „+/-“ steht beispielhaft für Grenzszenarien, die gerade die angestrebte Anzahl von 1 Million Elektrofahrzeugen erreichen (siehe auch Abbildung 3). Um diese Zielvorgabe zu erreichen, kann der Ölpreis von der maximal angenommenen Höhe (130 \$/Barrel) bis zum mittleren Wert von 115 \$/Barrel abweichen. Die Batteriekosten müssen jedoch zur Erreichung der Millionen-Marke um 9 % und mehr sinken. Die Nutzen-Kosten-Differenz beträgt immer noch 0,8 Mrd. €, das Nutzen-Kosten-Verhältnis rentable 1,5.
- Das Szenario 4 bildet das Ergebnis, das sich einstellt, falls beide Einflussgrößen jeweils genau die mittlere Ausprägung einnehmen. Es spiegelt den wahrscheinlichsten Fall und somit das „best estimate“ wider. Die Nutzen-Kosten-Differenz liegt bei 331 Mio. €, das Nutzen-Kosten-Verhältnis 1,4.
- Die weiteren Szenarien 3 „0/+“ und 5 „-/0“ veranschaulichen den Bereich um den in Szenario 4 bestimmten Mittelwert. In ihm liegen etwa 80 % der errechneten Ergebnisse. Der Bereich zwischen 380.000 und 820.000 Stück bildet demnach ein Konfidenzintervall. Die Nutzen-Kosten-Differenz schwankt zwischen 0,5 Mrd. € und 0,2 Mrd. €, das Nutzen-Kosten-Verhältnis zwischen 1,4 und 1,3.
- Der „worst case“ (Szenario 6) – bezogen auf den Verkauf von Elektrofahrzeugen – ergibt sich bei nur geringen Batteriefortschritten und einer nur mäßigen Steigerung des Ölpreises und zeigt eine nur sehr schwache Marktdurchdringung mit rund 100.000 Fahrzeugen. Die Nutzen-Kosten-Differenz beträgt nur 28 Mio. €, das Nutzen-Kosten-Verhältnis erreicht mit 1,2 nur soeben die Rentabilitätsschwelle.

Zusammenfassend zeigt die Analyse verschiedener Szenarien, dass für niedrige Kraftstoffpreise und höhere Batteriekosten das Elektrofahrzeug bis 2020 für viele potenzielle Käufer unrentabel bleibt und das Ziel von einer Million Fahrzeugen bis 2020 aufgrund der mangelnden Marktentwicklung deutlich verfehlt wird. Das Nutzen-Kosten-Verhältnis, das anhand der errechneten Marktentwicklung bewertet, welche Wirkungen mit der Verbreitung von Elektrofahrzeugen im Zeitraum bis 2020 verbunden sind, fällt für alle Szenarien positiv aus. Zusätzlich dient jedoch die Nutzen-Kosten-Differenz, die für niedrige Neuzulassungszahlen auch nur geringe Überschüsse aufweist, zur richtigen Einordnung der Bewertung.

Die zukünftige Marktdurchdringung wird jeweils durch einen Vergleich der kritischen Fahrleistung mit den Fahrleistungsprofilen deutscher Pkw-Fahrer bestimmt, so dass nur Fahrer, die diese Fahrleistung übertreffen, als potenzielle Kunden eingerechnet werden. Dadurch werden nur Fahrzeuge und entsprechend hohe Fahrleistungen betrachtet, die einer

rationalen Amortisationsüberlegung des Kunden folgend tatsächlich in den Straßenverkehr gelangen. Im ungünstigsten Fall wird deutlich, dass die geringe Zahl von Fahrzeugen die ausgewiesenen Nutzenüberschüsse überhaupt nur aufgrund ihrer hohen Fahrleistungen bewirken.

Die Stückzahlen der dargestellten Szenarien, die sich aus allen Variationen der Szenario-parameter ergeben, können als Fläche in einem dreidimensionalen Ergebnisraum abgebildet werden. Abbildung 4 veranschaulicht grafisch, wie aus der degressiven Kostenentwicklung der Batterie und dem linearen Verlauf des Ölpreises eine gekrümmte Ergebnisebene resultiert, sodass vor allem Veränderungen des Batteriepreises starke Nachfrageänderungen bewirken. Die Szenarien, die die Millionengrenze übertreffen, werden repräsentiert durch die Fläche oberhalb der Linie bei $y = 1,0$ [Mio]. Sie bilden 16,6 % aller möglichen Szenarien und decken wegen ihrer Lage im Randbereich eher unwahrscheinliche Fälle ab.

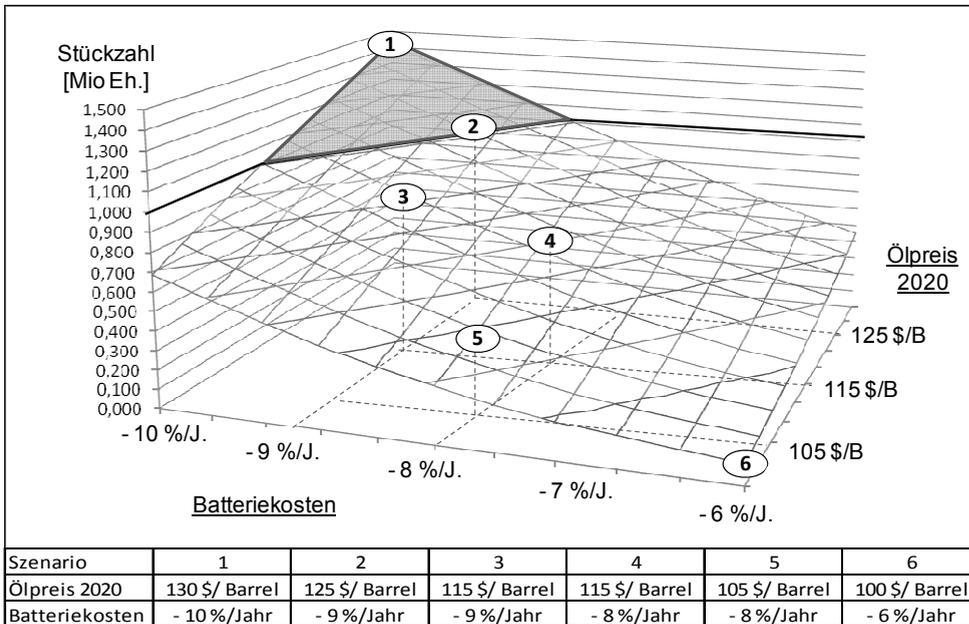


Abbildung 4: Überblick über Gesamtstückzahlen in 2020 für alle betrachteten Batteriekosten-[%/Jahr] und Ölpreisszenarien [\$/Barrel]; Quelle: eig. Berechnungen

5.4 Förderbedarf zur Zielerreichung von 1 Million Elektrofahrzeuge

Das Ziel, eine Million Elektrofahrzeuge auf die Straße zu bringen, ist - wie gezeigt - allein durch betriebswirtschaftlich rationale Marktentscheidungen der Käufer nur unter sehr

günstigen Bedingungen zu erreichen. Allerdings kann der Staat durch geeignete Fördermaßnahmen (u. a. Subventionen, Prämien, Steuernachlässe) helfen, Stückzahlen in der gewünschten Höhe zu erreichen.

Für dieses Ausmaß an Fahrzeugen gilt jedoch dann nicht per definitionem das kosten-effiziente Kaufkriterium der kritischen Fahrleistung. Durch den Zuschuss werden vielmehr der Mehrpreis und damit die Schwelle zum Kauf künstlich gesenkt. Dadurch werden zwar die in den Jahren 2015 bis 2020 angestrebten Stückzahlen eines erfolgreichen Markthochlaufs erreicht. Die begleitende Nutzen-Kosten-Analyse zeigt jedoch, dass sich durch die Förderung negative Effekte für die Gesamtwohlfahrt einstellen.

Ausgehend von den Szenariobedingungen und den erwarteten Stückzahlen wird im Folgenden geprüft, welcher Förderbetrag theoretisch erforderlich wäre, um die Anschaffungskosten des Elektrofahrzeugs und die kritische Fahrleistung soweit zu senken, dass zusätzlich zu den entsprechend dem Marktmodell berechneten Stückzahlen ausreichend Fahrzeuge verkauft werden, um bis 2020 eine Million zu erreichen.

Das Ziel einer Million Elektrofahrzeuge wird in Stückzahlen pro Jahr in den beiden Fahrzeugkategorien ausgedrückt. Dazu wird zunächst ein Referenzszenario definiert, das in 2020 gerade eine Million Elektrofahrzeuge realisiert. Diese Stückzahlen bilden jährliche Bezugswerte und dienen damit als Zielvorgabe für die Förderung. Der errechnete Verlauf deckt sich mit den Annahmen zur Stückzahlentwicklung, wie sie vom Bundesumweltministerium im Rahmen des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität formuliert wurden.

Von der jährlichen Referenzstückzahl werden jeweils die in Kapitel 4 ermittelten Stückzahlen abgezogen, um die zusätzlich zu fördernden Stückzahlen zu bestimmen. Anschließend wird die kritische Fahrleistung des Referenzszenarios ermittelt, die im Marktmodell den Verkauf der Referenzstückzahl zur Folge hat. Aus der Differenz mit der geltenden – höheren - kritischen Fahrleistung wird errechnet, wie weit die kritische Fahrleistung zur Erreichung der gewünschten Stückzahl gesenkt werden muss. In Kapitel 4 gibt die kritische Fahrleistung die Fahrleistungsschwelle an, die sich aus den Szenariobedingungen ergibt, hier ist sie nun die gegebene Größe, aus der sich der Subventionsbetrag ergibt. Formel 2 kann nach dem Subventionsbetrag umgeformt werden.

$$\text{kritische Fahrleistung} \left(\frac{\text{km}}{\text{Jahr}} \right) = \frac{\text{jährl. Mehrkosten} \left(\frac{\text{€}}{\text{Jahr}} \right)}{\Delta \text{ Ersparnis} \left(\frac{\text{€}}{\text{km}} \right) + \text{Subvention}} \quad (2)$$

Diese Senkung der kritischen Fahrleistung auf das gerade notwendige Niveau kann dann in einen Zuschuss pro Fahrzeug zum Zeitpunkt der Anschaffung umgerechnet werden. Durch

den Zuschuss wird die Schwelle zum Kauf des Elektrofahrzeugs reduziert und die gerade gewünschte Stückzahl gefördert. Die Förderung schließt somit die Lücke zwischen den Mehrkosten für das Fahrzeug und der zum Zeitpunkt der Anschaffung erwarteten Ersparnis aus dem zukünftigen Betrieb. Der gesamte Förderbetrag, der theoretisch ausreicht, um das Ziel zu erreichen, ergibt sich aus der fehlenden Anzahl Fahrzeuge multipliziert mit dem oben bestimmten Förderbetrag pro Fahrzeug.

Zusätzlich zur Förderung, die zusätzliche Stückzahlen generiert, sind Mitnahmeeffekte zu berücksichtigen. Auch Käufer, die sich ohnehin aufgrund des Kostenvorteils für ein Elektrofahrzeug entscheiden, profitieren von der Förderung, so dass zusätzlich zum errechneten Bedarf verlorene Förderkosten entstehen. Daraus resultiert eine wesentlich höhere Gesamtfördersumme. Die Höhe dieses Effekts ergibt sich, indem auch alle im Marktmodell ermittelten Stückzahlen von der zum Kaufzeitpunkt gültigen Förderregelung profitieren. In allen Szenarien sinkt die notwendige Förderung pro Fahrzeug bis 2020 kontinuierlich, da auch die kritische Fahrleistung ohne Zuschuss von Jahr zu Jahr sinkt.

Referenzszenario: 1 Million Fahrzeuge bis 2020							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Gesamt
City-BEV/ Jahr	24.969	54.255	79.583	125.201	167.418	200.557	651.983
BEV /Jahr	0	0	8.034	56.893	114.099	169.069	348.095
Anzahl E-Fhgz./Jahr	24.969	54.255	87.617	182.094	281.517	369.626	1.000.078
Gesamtstückzahl	24.969	79.224	166.841	348.935	630.452	1.000.078	1.000.078

Szenario 3		Szenario 4	
Stückzahl aus Marktmodell	823.574	Stückzahl aus Marktmodell	583.209
zusätzliche Stückzahl durch Förderung	176.504	zusätzliche Stückzahl durch Förderung	416.869
Förderbeträge für 1 Mio E-Fhgz. in Mio €		Förderbeträge für 1 Mio E-Fhgz. in Mio €	
Förderbedarf 2010 - 2020	348	Förderbedarf 2010 - 2020	1.121
Mitnahmeeffekt (gleicher Zeitraum)	1.037	Mitnahmeeffekt (gleicher Zeitraum)	976
gesamte Fördersumme	1.384	gesamte Fördersumme	2.097
Szenario 5		Szenario 6	
Stückzahl aus Marktmodell	377.269	Stückzahl aus Marktmodell	103.946
zusätzliche Stückzahl durch Förderung	622.809	zusätzliche Stückzahl durch Förderung	896.132
Förderbeträge für 1 Mio E-Fhgz. in Mio €		Förderbeträge für 1 Mio E-Fhgz. in Mio €	
Förderbedarf 2010 - 2020	2.173	Förderbedarf 2010 - 2020	5.350
Mitnahmeeffekt (gleicher Zeitraum)	685	Mitnahmeeffekt (gleicher Zeitraum)	275
gesamte Fördersumme	2.858	gesamte Fördersumme	5.625

Tabelle 13: Förderbedarf und Mitnahmeeffekte für 1 Million Elektrofahrzeuge in verschiedenen Szenarien. Quelle: eig. Berechnungen

In Tabelle 13 sind vergleichend gegenübergestellt das Referenzszenario sowie die vier Beispielzenarien, in denen ein Zuschussbedarf entsteht. Ausgewiesen sind jeweils die tatsächliche Stückzahl aufgrund der kritischen Fahrleistung, die erforderliche zusätzliche Stückzahl zum 1 Million-Ziel, der Förderbedarf zur Erreichung der zusätzlichen Stückzahl sowie die Höhe des Mitnahmeeffektes.

- Für Szenario 6 – dem ungünstigsten Fall – sind 5,3 Mrd. € notwendig, um die vom Referenzszenario vorgegebenen Stückzahlen durch Kaufanreize zu erreichen. Gemäß dem Marktmodell muss somit ein Zuschuss von durchschnittlich 6.000 € zum Kauf eines zusätzlichen Elektrofahrzeugs geleistet werden, um Kunden genau in der Referenzstückzahl zum Kauf zu bewegen. Da fast 900.000 Elektrofahrzeuge eines Kaufanreizes bedürfen, fällt der Mitnahmeeffekt der verbleibenden 104.000 Fahrzeuge mit 275 Mio. € vergleichsweise gering aus.
- Für die mittlere Ausprägung der Szenariobedingungen in Szenario 4 wird zur Erreichung einer ausreichenden Stückzahl ein Förderbedarf von 1,12 Mrd. € abgerufen. Der Fördereraufwand würde sich durch die Mitnahmeeffekte auf 2,1 Mrd. € fast verdoppeln, ohne dass von der zusätzlichen Ausgabe eine marktfördernde Wirkung ausgehen würde.
- Im vergleichsweise günstigen Szenario 3 wird neben der theoretisch notwendigen Förderung in Höhe von 350 Mio. € ein Mitnahmeeffekt von 1 Mrd. € fällig. Dass fast die dreifache Summe ohne zusätzliche Wirkung aufgebracht werden muss, liegt an der bereits hohen Stückzahl der ohne Förderung absetzbaren Fahrzeuge.

Um die Sinnhaftigkeit der staatlichen Förderung zu bewerten, wird wiederum als Maßstab das Verhältnis aus resultierenden Nutzen und Kosten herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass die Förderausgaben wegen ihres Transfercharakters nicht als volkswirtschaftliche Kosten in das Nutzen-Kosten-Verhältnis eingehen. Wie zuvor entsprechen die Nutzen den Ersparnissen aus Betriebs- und Umweltkosten durch die Elektrofahrzeuge. Die Kosten sind wiederum die annuisierten Mehrkosten aller im Verkehr vorhandenen Elektrofahrzeuge. Eine Änderung gegenüber der vorherigen Nutzen-Kosten-Abwägung ergibt sich aus dem Stückzahlenverlauf. Ursprünglich wurde unterstellt, dass alle Fahrzeuge über das Marktmodell mit der kritischen Fahrleistung abgebildet werden, so dass nur Fahrzeuge mit geringer durchschnittlicher Fahrleistung verkauft werden, wenn es sich für sie finanziell lohnt. Jetzt mit Subventionen nimmt die kritische Fahrleistung ab, so dass auch Fahrzeuge mit geringer durchschnittlicher Fahrleistung im Verkehr anzutreffen sind und diese in die ökonomische Bewertung mit einbezogen werden. Die Bewertung des gesamten Szenarios wird durch die Berechnung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses vorgenommen, das überprüft,

ob die Ersparnisse an Betriebs- und Umweltkosten den Mehraufwand für die Batterien rechtfertigen.

Die Senkung der kritischen Fahrleistung für zusätzliche, subventionierte Fahrzeuge senkt auch die Durchschnittsfahrleistung aller Elektrofahrzeuge, da es sich durch die Subvention auch für Fahrer unterhalb der ursprünglichen kritischen Fahrleistung lohnt, ein Elektrofahrzeug zu kaufen. Die volkswirtschaftlichen Kosten für ein zusätzliches Elektrofahrzeug sind jedoch genauso hoch wie für die am Markt ohne Förderung absetzbaren Fahrzeuge.

Während die am Markt absetzbaren Fahrzeuge also gesamtwirtschaftlich positive Wirkungen hervorrufen, mindern die zusätzlich geförderten Fahrzeuge aufgrund ihrer geringeren Durchschnittsfahrleistung diesen Effekt. Das führt dazu, dass die fahrleistungsabhängigen Nutzen nicht in dem Maße wachsen, wie durch die zusätzlichen subventionierten Fahrzeuge Kosten entstehen. Die gesamten Nutzen von Elektromobilität sind im Endeffekt zu gering und reichen z. T. (z. B. im worst case) nicht mehr aus, um die Investitionen in teure Energiespeicher zu decken.

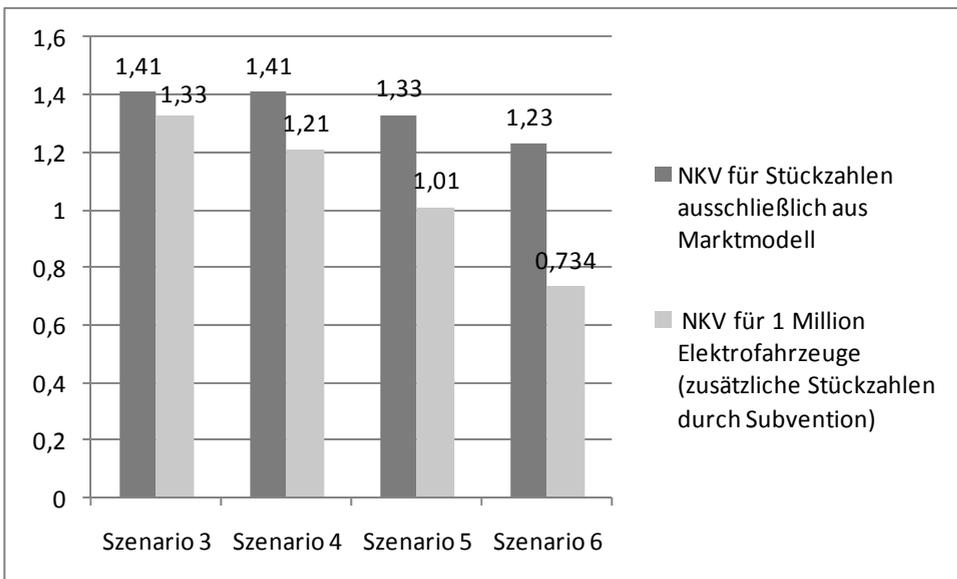


Abbildung 5: Vergleich der NKV jeweils mit und ohne Subvention durch Kaufzuschüsse;

Quelle: eig. Berechnungen

Abbildung 5 zeigt, dass sich die Nutzen-Kosten-Verhältnisse der Szenarien durch eine Subventionierung im Vergleich zum streng rationalen Markt durchweg verschlechtern. Besonders deutlich fällt dieses Missverhältnis im worst case (Szenario 6) aus: Die Mehrkosten für die Batterie werden nicht durch die fahrleistungsabhängigen Nutzen (Betrieb und Umwelt) gedeckt. Das Nutzen-Kosten-Verhältnis für 1 Million Elektrofahrzeuge mit Subventionen liegt nur bei 0,7. Unter diesen Umständen wäre es demnach nicht sinnvoll, eine Million Elektrofahrzeuge als Ziel vorzugeben und dieses Ziel durch massive Subventionen im Sinne von Kaufanreizen durchsetzen zu wollen.

Stattdessen wäre es sinnvoller, auf Seiten der Kosten anzugreifen und durch Investitionen in die Batterieentwicklung Preissenkungen auszulösen, um von daher konkurrenzfähige Produkte am Markt durchzusetzen. Die Konsequenz aus der Subventionierung wäre, dass ein teures und nicht ausreichend entwickeltes Fahrzeug, das eigentlich ein Nischenprodukt darstellen würde, durch erheblichen finanziellen Förderaufwand des Staates künstlich am Markt verbreitet würde.

6. Abschätzung der Erfolgchancen durch Marktsimulation

Mithilfe stochastischer Simulationsverfahren wird abschließend die Frage untersucht, wie wahrscheinlich diejenigen Szenarien sind, die eine erfolgreiche Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen versprechen. Als zentrales Kriterium für Erfolg gilt dabei das Ziel, bis 2020 eine Million Fahrzeuge auf den Markt zu bringen.

Am Beispiel des „best case“ wurde gezeigt, wie eine erfolgreiche Marktentwicklung ablaufen könnte. Aber alle Rahmenbedingungen müssen stimmen, damit Elektrofahrzeuge eine attraktive Alternative für eine entsprechend große Anzahl von Fahrern darstellen. Wenn dieser Rahmen nicht stimmt, sind die Fahrzeuge zu teuer für kostenbewusste Fahrer und finden keine Käufer. Da sich Wertepaare, die eine günstige Szenarientwicklung bedeuten, im Randbereich des Szenariofelds befinden, muss geprüft werden, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Szenario, das 1 Million übertrifft, eintritt.

Die zentralen Rahmenbedingungen sind anhand der dargestellten Prognoseintervalle so zu modellieren, dass dieser Modellrahmen die realistisch zu erwartenden Ausprägungen abdeckt. Das ermöglicht Rückschlüsse darauf, welche Entwicklung am wahrscheinlichsten eintreten wird bzw. wie wahrscheinlich die Zielmarke von einer Million ist. Abbildung 6 zeigt, wie der Unsicherheit über die Entwicklung der zentralen Rahmenbedingungen im Berechnungsmodell begegnet wird.

Durch die Verwendung stochastisch verteilter Zufallsgrößen können die unsicheren Rahmenbedingungen abgedeckt werden. Die Eigenschaften dieser Zufallsgrößen entsprechen den prognostizierten Rahmenbedingungen und implementieren deren unsicheren Verlauf im Simulationsmodell. Das ermöglicht am Ende der Berechnung die Aussage, wie hoch die tatsächlichen Erfolgchancen sind.

Berechnungsschritte zur Ermittlung der Erfolgswahrscheinlichkeit von Elektromobilität bis 2020

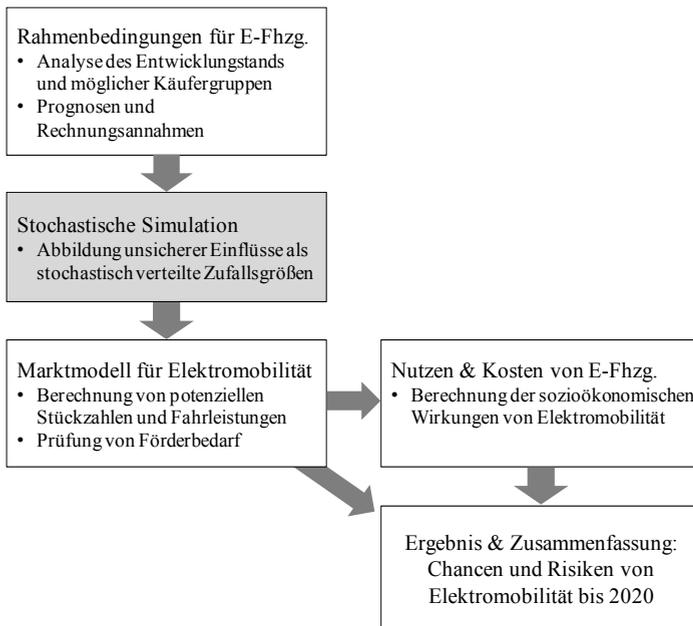


Abbildung 6: Bestimmung der Erfolgswahrscheinlichkeit der Marktdurchdringung bzw. der Nutzen und Kosten von Elektrofahrzeugen bis 2020 anhand von stochastischer Simulation

Das stochastische Simulationsmodell bildet demnach die Rahmenbedingungen ab und liefert Eingangswerte, die dann im Marktmodell weiterverwendet werden. Die Entwicklung des Ölpreises und der Batteriekosten bis 2020 sind die für Elektromobilität zentralen Einflussgrößen, da sie maßgeblich die Marktchancen der Elektrofahrzeuge bestimmen. Die Rahmenbedingungen für jedes Szenario werden also durch ein Wertepaar aus einem Wert für den Ölpreisverlauf bis 2020 und einem Schätzwert für die Batteriekosten definiert.

Für den Ölpreis wird angenommen, dass er bis 2020 unterschiedlich stark steigen wird, wovon die Höhe der Betriebskostensparnis abhängt, die das Fahren mit einem Elektrofahrzeug bietet. Der Zukunftsmarkt für Lithium-Ionen-Batterien verspricht deutliche

Kostenrückgänge durch Entwicklungsfortschritte und Produktionsausbau, aber wie stark die Batteriekosten jährlich sinken, ist nicht vorherzusagen. Von der Kostenentwicklung hängen die Marktpreise für Elektrofahrzeuge und damit auch die Mehrkosten für den Kunden ab.

Also leiten sich im gewählten Modell die Marktchancen aus diesen beiden Eingangsgrößen ab. Die Marktmodellierung vergleicht die aus dem Wertepaar resultierende, kritische Fahrleistung mit den Fahrleistungen potenzieller Fahrzeugkäufer und rechnet so den jährlichen Marktanteil an den Neuzulassungen um. Wie anhand gezielt ausgewählter Wertepaare gezeigt wurde, kann bis 2020 eine Gesamtstückzahl zwischen 1,4 Mio. und 100.000 Fahrzeugen eintreten. Das heißt, dass die Annahmintervallbreite der Einflussgrößen sich in einem ebenso großen Intervall der resultierenden Stückzahlen niederschlägt.

Diese Größen spannen damit den realistisch zu erwartenden Szenarioraum auf. Der Ölpreis in 2020 nimmt demnach einen beliebigen Wert zwischen 100 und 130 \$/ Barrel an, während die jährliche Batteriekostenabnahme jeden Wert zwischen 6 und 10 % betragen kann.

Jeder Wert in diesem Intervall und somit jedes Wertepaar kann theoretisch eintreten, Wertepaare an den Randbereichen sind jedoch weniger wahrscheinlich als diejenigen im Zentrum. Mittlere Werte der beiden Einflussgrößen hingegen sind innerhalb der angenommenen Intervalle wahrscheinlicher als extrem große oder extrem kleine Werte. Diese Wahrscheinlichkeitsannahmen zu Öl- und Batteriepreis können durch die Verwendung von normalverteilten Zufallsgrößen abgebildet werden. Je wahrscheinlicher ein Wert ist, desto häufiger wird dieser Wert auch als stochastische Zufallsgröße generiert.

Die Eigenschaften einer Normalverteilung werden durch den Erwartungswert (μ), der hier der mittleren Annahme entspricht, und die Standardabweichung (σ), die die Streuung innerhalb der Intervalle beschreibt, in der Formel wie folgt vorgegeben:

$$\text{Verteilungsfunktion} = N(\mu, \sigma)$$

Durch Anpassung dieser Funktion an die Werte der Rechnungsannahmen ergibt sich für den Ölpreis eine $N(115;5)$ -Verteilung und für die Batterie eine $N(0,92;0.004)$ -Verteilung. Derartig generierte Zufallszahlen bilden also die mögliche Entwicklung der Öl- und Batteriepreise auf den beschriebenen Intervallen ab.

Abbildung 7 zeigt, welche Streuung sich beispielhaft für 1.000 Wertepaare einstellt. Während mittlere Werte sehr oft auftreten, sind extreme Werte im Randbereich seltener. Die Zufallszahlen geben damit die Erwartung wieder, dass sich diese Werte zwar einstellen können, eine mittlere Entwicklung aber wesentlich wahrscheinlicher ist.

Dieses Verfahren entspricht einer Monte-Carlo-Simulation unterschiedlicher Marktzustände, die durch eine zufällige Variation der zentralen Einflussgrößen in der Lage ist, die Marktentwicklung für eine hohe Anzahl von möglichen Szenarien zu errechnen. Aus den beiden normalverteilten Zufallsgrößen werden in dem verwendeten Simulationsmodell beliebig viele Marktbedingungen erzeugt, so dass das Szenario durch die zufälligen gewählten Einflussgrößen „Ölpreis“ (z. B. „112,5 \$/Barrel in 2020“) und „Batteriekostenentwicklung“ (z. B. „8,45 % Kostenrückgang/Jahr“) definiert ist.

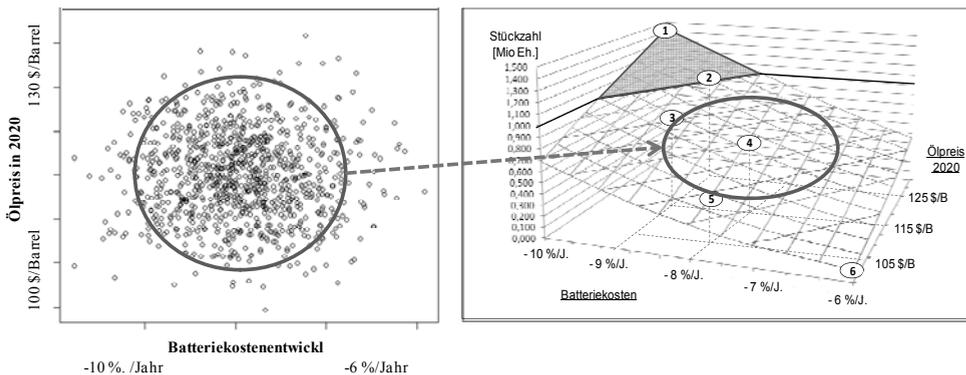


Abbildung 7 –links: Streuung der Wertepaare von 1.000 Szenarien aus Ölpreis- (Y-Achse) und Batteriekostenentwicklung (X-Achse); rechts: resultierende Gesamtstückzahl bis 2020 (Z-Achse); Quelle: eig. Berechnungen

Mithilfe der Methodik zur Marktpotenzial-Berechnung bzw. der damit verbundenen Nutzen und Kosten wird jedes der simulativ generierten Szenarien einzeln durchgerechnet. Zentrale Kennwerte jedes Berechnungslaufs (NKV, Jahresfahrleistung, jährlich verkaufte Stückzahlen etc.) werden in einer Ergebnisliste fortgeschrieben. Dieser Vorgang wird nun für eine beliebig hohe Anzahl von Szenarien wiederholt, z. B. für 100 oder 1.000 Szenarien.

Die simulierten Ergebnisse können anschließend anhand deskriptiver Verfahren untersucht werden. Zunächst wird anhand des fortlaufend gebildeten Mittelwerts über die Gesamtstückzahl – das jeweils nächste Ergebnis wird addiert und der Nenner um eins erhöht – untersucht, ob das Simulationsmodell erwartungstreu ist. Der Mittelwert der Stückzahl konvergiert schon ab etwa 500 simulierten Szenarien, so dass das angenommene Modell erwartungstreu auf den Mittelwert aus Szenario 4 zuläuft (Abbildung 8 - links).

Besonders relevant im Sinne der Zielsetzung der Simulation ist die Untersuchung der Häufigkeit von Szenarien mit hohen Stückzahlen. Innerhalb der errechneten Ergebnisse kann geprüft werden, wie oft die errechnete Stückzahl eine Million Elektrofahrzeuge bis

2020 überschreitet. Verglichen mit der Anzahl möglicher Szenarien, die diese Stückzahlhöhe überschreiten (16,6 %, siehe Abb. 4), ist die Häufigkeit, mit der simulativ eine Gesamtstückzahl von über 1 Million erreicht wird, mit 1-2 % deutlich geringer. Also bleiben die Stückzahlen bis 2020 unter den angenommenen Rahmenbedingungen – und ohne etwaige Fördermaßnahmen – mit mehr als 95 % Wahrscheinlichkeit unter einer Million.

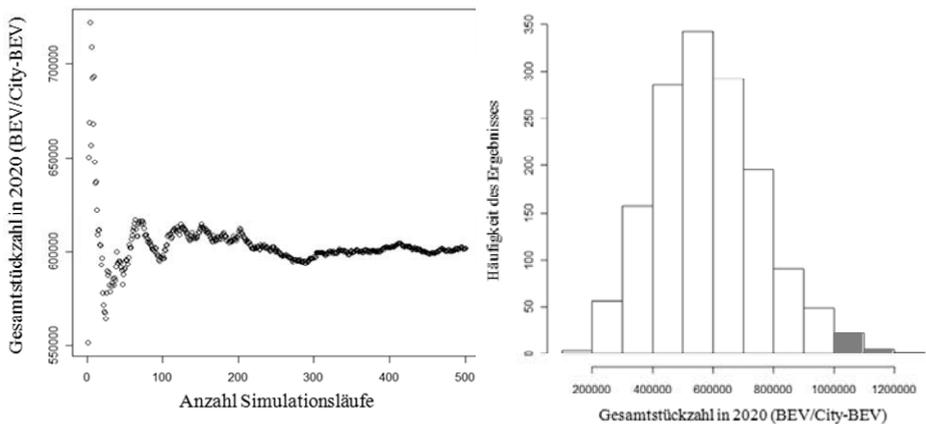


Abbildung 8: Stückergebnisse der stochastischen Marktsimulation bei a) $n = 500$ (fortlaufender Mittelwert) und b) $n = 1.000$ Simulationen (Streuung); Quelle: eig. Berechnungen

Außerdem kann die Streuung der Ergebnisse untersucht werden. Abbildung 8 (rechts) bzw. die darunter angegebenen Quartile der Simulation zeigen, dass etwa 80 % der Marktverläufe im Bereich zwischen 370.000 und 830.000 Fahrzeugen (vgl. Beispielszenarien 3 bis 5) liegen. Diese Szenarien sind alle z. T. deutlich von einer Million Elektrofahrzeuge entfernt.

Die gesammelten Ergebnisse lassen zusätzlich auch die Prüfung der Korrelation zwischen Nutzen-Kosten-Verhältnis und Marktstückzahl zu. Diese beiden Szenariokennwerte sind positiv korreliert. Das heißt, dass sich bei steigenden rational begründeten Käuferzahlen immer auch eine bessere sozioökonomische Bewertung des Szenarios einstellt. Das Nutzen-Kosten-Verhältnis fällt also umso besser aus, je mehr Kunden sich für Elektromobilität entscheiden, sofern keine ökonomisch falschen Anreize gesetzt werden.

7. Ergebnis

Die vorliegende Abschätzung zum Marktpotenzial und den volkswirtschaftlichen Nutzen und Kosten der Elektromobilität erlaubt Schlussfolgerungen darüber, unter welchen Umständen das Ziel 1 Million Elektrofahrzeuge erreicht werden kann und welche Rolle der Staat bei der Förderung der Elektromobilität hat.

- Aus den verfügbaren Daten aus Forschung und Entwicklung und den darauf aufbauenden Prognosen wird zunächst ein Bewertungsrahmen aus Break-Even- und Nutzen-Kosten-Analyse geschaffen. Dieser Rahmen lässt eine Variierung der zentralen Einflussgrößen – Ölpreisentwicklung und Batteriekosten – in Entwicklungsszenarien zu. Die vorliegenden Erkenntnisse werden verknüpft mit anerkannten Bewertungsverfahren der Verkehrsökonomik. Dadurch werden die Untersuchungen abgesichert und spiegeln die Bandbreite möglicher Entwicklungen wider.
- Die Ermittlung der am Markt absetzbaren Elektrofahrzeuge in den verschiedenen Szenarien zeigt, dass sich die Stückzahlen bis 2020 in einer Spannweite zwischen 100.000 und 1,5 Mio. Elektrofahrzeuge bewegen. Dieses Marktpotenzial ergibt sich aufgrund der kostenrationalen Modellierung anhand der kritischen Fahrleistung. Die Marktsimulation der verkauften Elektrofahrzeuge strebt einem Erwartungswert von 600.000 Stück zu.
- Berücksichtigt werden dabei bestimmte Mobilitätsrestriktionen, die das Marktpotenzial einschränken. Im Vordergrund stehen dabei die Beschränkung auf Zweitwagen und privat aufzuladende Fahrzeuge. Eine zusätzliche Unbekannte für die tatsächliche Realisierung dieser Prognosewerte bleibt aber die Akzeptanz: Wie flexibel sind durchschnittliche Pkw-Nutzer tatsächlich, so dass sie aufgrund zukünftiger Ersparnisse ein vollkommen neues Fahrzeugkonzept zur alltäglichen Fortbewegung nutzen werden? Die zunächst hohen Kosten setzen Vertrauen in die Technologie voraus, die als Schlüsselmerkmale vor allem durch Haltbarkeit und Ladeeigenschaften der Batterie überzeugen muss, um von einer breiten Käuferschicht akzeptiert zu werden.
- Die volkswirtschaftliche Sinnhaftigkeit der Elektromobilität wird mit Hilfe von Nutzen-Kosten-Analysen überprüft. Die errechneten Nutzen-Kosten-Verhältnisse umfassen alle ressourcenwirksamen Effekte, die ein Ersatz konventioneller Benzinfahrzeuge (Ohne-Fall) durch Elektrofahrzeuge (Mit-Fall) in gleicher Stückzahl nach sich zieht. Die Nutzen bestehen aus eingesparten Betriebs- und Umweltkosten, die Kosten aus den Mehrkosten für den Energiespeicher. In allen Szenarien erweist sich die Elektromobilität als effizient ($NKV > 1$), eine höhere Marktdurchdringung bedeutet

auch immer ein besseres Nutzen-Kosten-Verhältnis. Von daher ist die Strategie der Elektromobilität volkswirtschaftlich – wenn auch nur knapp – als rentabel anzusehen.

- Die Nutzen-Kosten-Analyse kann abgesehen von dem Rentabilitätstest angewendet werden, um die Zweckmäßigkeit von Subventionen des Staates für die Elektromobilität zu bewerten. Die finanzielle Förderung von Elektromobilität erweist sich aus volkswirtschaftlicher Sicht als problematisch, da sich dadurch das Nutzen-Kosten-Verhältnis verschlechtert. Im rationalen Kaufmodell wird durch eine staatliche Förderung die kritische Fahrleistung künstlich gesenkt. Dadurch kommen Elektrofahrzeuge in den Verkehr, die eine geringere durchschnittliche Fahrleistung als die kritische Fahrleistung haben. Das führt dazu, dass die fahrleistungsabhängigen Nutzen nicht in dem Maße wachsen, wie durch die zusätzlich subventionierten Fahrzeuge Kosten entstehen. Die Folge ist, dass das Nutzen-Kosten-Verhältnis bei Fahrzeugsubventionen abnimmt und in ungünstigen Fällen kleiner als 1 wird.
- Statt der Subventionen wäre es sinnvoller, auf Seiten der Kosten anzugreifen und die technische Batterieentwicklung staatlich zu unterstützen, um damit eine deutliche Kostensenkung der Elektrofahrzeuge zu erreichen. Durch geringere Kosten in der Herstellung sinken die Preise für die Nutzer, so dass sich ein nachhaltiger Nachfrageschub ergibt. Aus industriepolitischer Sicht ist es wichtig, dass auch in Deutschland an Energiespeichern geforscht und die Produktion dieser Komponenten und somit der Wertschöpfungsanteil in Deutschland gehalten wird. Die jahrzehntelangen Erfolge deutscher Ingenieurskunst im Motoren- und Fahrzeugbau dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich vor allem asiatische Hersteller im Bereich elektrifizierter Antriebe bereits einen technologischen Vorsprung erarbeitet haben.
- Die staatliche Subventionierung der FuE-Kosten muss ergänzt werden durch Innovationen, die von der deutschen Automobilindustrie mitfinanziert werden. Elektromobilität kann auch von Anbietern aus anderen Branchen profitieren und muss nicht auf die verzögerten Produkte klassischer Automobilunternehmen warten. Daher sind Markteintritte von Start-ups, Ausgründungen anderer Elektrotechnik-Unternehmen oder sogar neuer Kleinserienhersteller zu fördern. Dadurch wären die Automobilunternehmen wiederum unter Zugzwang, in entsprechende Alternativen zu investieren, um ihrem eigenen Innovationsanspruch gerecht zu werden und im zukünftig profitablen Markt für Elektrofahrzeuge vertreten zu sein. Ein Nachfrageimpuls durch Kaufzuschüsse würde aufgrund des technologischen Rückstands und geltender Diskriminierungsverbote vor allem ausländischen Fahrzeugherstellern zugutekommen, die bereits Fahrzeuge auch in Deutschland anbieten.

Die Zukunft der Mobilität wird auf das Problem der steigenden Ölpreise von zahlreichen neuen Technologien geprägt werden. Synthetische Kraftstoffe aus Biomasse, eine ver-

besserte, intermodale Vernetzung verschiedener Transportmittel wie auch moderne Siedlungs-, Arbeits- und Kommunikationskonzepte, die die Überbrückung energieintensiver Entfernungen ersparen, können ebenso wie Elektroantriebe vom Wandel der Verkehrsbedingungen profitieren. Das bietet für Elektromobilität zwar Chancen durch Carsharing, Verbindung mit ÖPNV oder einen gemeinsam wachsenden Markt für „grüne“ Pkw, aber auch Risiken, falls die Kosten im Vergleich mit anderen Alternativen nicht sinken und Elektrofahrzeuge dadurch im Vergleich teuer und unkomfortabel in der Nutzung bleiben.

Abstract

This study analyses the socio-economic efficiency by carrying out a cost-benefit analysis of electric mobility in Germany. The assessment leads to evidence whether the current policy strategy of funding electric mobility is promising, in particular the Federal Government's National Development Plan for Electric Mobility (NEP) with financial means amounting to 500 million Euros. Question is, if the short term goals of this funding scheme are reasonable and realistic from an economic point of view. This can be expressed by quantifying the potential market for electric vehicles and summing the impact of electric mobility up to a cost-benefit ratio. The cost-benefit analysis is carried out based on alternative market deployment scenarios (a weighted range of worst to best case scenarios). The market potential in Germany – depending on development of oil price and battery cost – is derived by a customized break-even analysis and leads to a range of results between 100.000 and 1.5 million electric vehicles sold until 2020. The mean – most probable – scenario for the displayed parameter range results in 600.000 vehicles, hence the goal of achieving 1 million electric vehicles seems way out of reach. The cost-benefit analysis of this market run-up phase relies on current mobility characteristics as well as assessment methodology and compares the impacts on operating costs (fuel savings) and environmental cost (CO₂, NO_x, noise) with the additional cost for electric energy storage. The cost-benefit ratio is between 1.2 and 1.6, proving a marginal socio-economic efficiency (CBR > 1), giving a justification for the general direction of the policy strategy brought up in the NEP. But depending on the conditions, public subsidies of at least 1.4 - 5.6 billion Euros need to be raised to generate additional purchases and to achieve the goal of 1 million electric vehicles until 2020. However, this type of funding is questionable due to the risks of windfall gains as well as impairments of the cost-benefit ratio. Funding leads to a lower break-even mileage which results in lower average mileage per vehicle. Hence, regarding additionally induced vehicle purchases, benefits do not increase in proportion with cost, which lowers the socioeconomic efficiency. Instead of artificially raising the demand, it seems more reasonable to approach the market constraints on the cost side by supporting urgently needed proceedings in battery technology which should lead to lower costs and prices on the supply side. Concerning wider economic impacts from an industrial policy perspective, it is important to establish and keep R&D as well as production capacities of energy storage technology in Germany. Otherwise not only sustainable mobility is endangered, but also Germany as a future location for automotive industry.

Literatur

- Accenture (2009)*: Accenture Automotive: E-Mobility 2009; http://www.accenture.com/NR/rdonlyres/2B9F91A0-18F8-4BA04C9A00DFBDD12/0/Accenture_Umfrage_EMobility_2009.pdf
- ADAC (2010a)*: Allgemeiner Deutscher Automobil Club: Steuersätze nach Schadstoff-Schlüsselnummern. http://www1.adac.de/images/25688Steuersätze_tcm8-242243.pdf
- ADAC (2010b)*: Allgemeiner Deutscher Automobil Club: Neue Kfz-Steuer - Erstzulassung ab 01. Juli 2009. http://www1.adac.de/Auto_Motorrad/autokosten/Kfz-Steuer/neu/Grundlagen/Erstzulassung_ab_01_Juli_2009.asp?ComponentID=241548&SourcePageID=241555
- ADAC Autokatalog (2010)*: ADAC Autokatalog http://www1.adac.de/Auto_Motorrad/Autokatalog/default.asp?autokatmode=3&CarID=9256
- Axsen et al. (2008)*: Axsen, Jonn; Kurani, Kenneth S.; Burke, Andrew: Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008. Institute of Transportation Studies University of California, Davis 2008
- BCG (2009)*: Boston Consulting Group: Batteries for Electric Cars – Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. Boston Consulting Group, Düsseldorf 2009. <http://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>
- Biere et al. (2009)*: Biere, David; Dallinger, David; Wietschel, Martin: Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft, 02/2009, S. 173-181
- BMU (2008b)*: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Ausbau erneuerbarer Energien im Strombereich. Stuttgart 2008. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ausbau_ee_strom.pdf
- BMVBS (2009)*: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Mobilität in Deutschland 2008; infas GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Verkehrsforschung, Bonn und Berlin 2010.
- Bundestag (2010)*: Antwort der Bundesregierung auf die Große Anfrage zur Technologieführerschaft Deutschlands; Deutscher Bundestag, Drucksache 17/3106, Berlin, 2010
- Businessweek (2010)*: Bloomberg Businessweek: Oil to Reach \$108 by 2020 as Economy Grows, EIA Says <http://www.businessweek.com/news/2010-05-25/oil-to-reach-108-by-2020-as-economy-grows-eia-says-update1-.html>
- CE Delft (2008)*: CE Delft, Solutions for environment, economy and technology: Handbook on estimation of external costs in the transport sector. http://ec.europa.eu/transport/sustainable/doc/2008_costs_handbook.pdf
- DAT (2010)*: Deutsche Automobil GmbH: Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen. (Hrsg.) DAT, Ostfildern 2010. <http://www.dat.de/leitfaden/LeitfadenCO2.pdf>
- Hautzinger et al. (2005)*: Hautzinger, Heinz; Stock, Wilfried; Schmidt, Jochen: Erstellung vom Mikrodatenfiles zu Ein- und Mehrtagesreisen auf Basis der Erhebungen MiD und DATELINE. Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung, Heilbronn und Mannheim 2005

IEA (2009): International Energy Agency: World Energy Outlook 2009. International Energy Agency, Paris 2009.

JURIS (2010): Bundesministerium der Justiz, KWKG, EEG - Gesetzestexte online (Stand 2010); http://bundesrecht.juris.de/kwkg_2002/index.html

Kalhammer et al. (2007): Kalhammer, F.R.; Kopf, B.M.; Swan, D. et al.: Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology: Report of the ARB Independent Expert Panel 2007, Prepared for State of California Air Resources Board. Sacramento, California 2007. http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevreview/zev_panel_report.pdf

Kley et al. (2009a): Kley, Fabian; Wietschel, Martin; Dallinger, David: Assessment of Future EV Charging Infrastructure. Conference International Advanced Mobility Forum, Geneva 2010. <http://www.klewel.com/iamf2010/talk.php?talkID=33>

Kley (2009b): Kley, Fabian: The Future of E-Mobility; Präsentation Infraday Fraunhofer ISI, 9. Oktober 2009, Karlsruhe, 2009

Kromer & Heywood (2007): Kromer, Matthew M.; Heywood, John B.: Electric Powertrains – Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet. Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology - Laboratory for Energy and the Environment. Cambridge 2007

Rosenkranz (2009): Rosenkranz, Christian: Mobile Speicher elektrischer Antriebsenergie – Lebensdauer und Belastung von Batterien. Dritte Niedersächsische Energietage, Hannover 2009.

RWE (2010): “e-Drive” Internetauftritt der RWE AG „Elektromobilität geht in Serie“; Link: <http://www.rwe-mobility.com/web/cms/de/486390/rwemobility/produkte/e-drive/>

Scrosati & Garche (2010): Scrosati, Bruno; Garche, Jürgen: Lithium batteries: Status, prospect and future. In: Journal of Power Source, Vol. 195 (2010), S. 2419-2430

Shell (2010): Deutsche Shell Holding GmbH: Historische Kraftstoffpreise; http://www.shell.de/home/content/deu/products_services/on_the_road/fuel/fuel_pricing/historical_prices/

UBA (2007): Umweltbundesamt: „Climate Change – Klimaschutz in Deutschland – 40%-Senkung der CO₂-Emissionen bis 2020 gegenüber 1990“, Berlin, 2007. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3235.pdf>

UBA Österreich (2010): Umweltbundesamt Österreich: Neue CO₂-Grenzwerte bei Pkw. http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/verkehr/fahrzeugtechnik/pkw/co2_pkw_2008/

Wietschel & Bünger (2010): Wietschel, Martin / Bünger, Ulrich: Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-Freie Endenergieträger. (Hrsg.) Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe 2010.

Wietschel et al. (2009): Wietschel, Martin; Kley, Fabian; Dallinger, David: Eine Bewertung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. In: Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft, 3 (2009), S. 33 – 41