

81. Jahrgang – Heft 3 – 2010

ZEITSCHRIFT FÜR VERKEHRSWISSENSCHAFT

INHALT DES HEFTES:

Nutzen-Kosten- Analyse der Elektromobilität Von Herbert Baum, Jan Dobberstein und Basitan Schuler, Köln	Seite 153
Die Transporte von Rohstoffen für die Stahlindustrie in der Rheinschifffahrt Von Norbert Kriedel, Straßburg	Seite 197
Elektromobilität: Brennstoffzelle mit Wasserstoff Von Gottfried Ilgmann, Berlin	Seite 213

Manuskripte sind zu senden an die Herausgeber:

Prof. Dr. Herbert Baum
Prof. Dr. Rainer Willeke
Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln
Universitätsstraße 22
50923 Köln
e-mail: h.baum@uni-koeln.de

Verlag – Herstellung – Vertrieb – Anzeigen:
Verkehrs-Verlag J. Fischer, Corneliusstraße 49, 40215 Düsseldorf
Telefon: (0211) 9 91 93-0, Telefax (0211) 6 80 15 44
www.verkehrsverlag-fischer.de
Einzelheft EUR 24,50 – Jahresabonnement EUR 64,00
zuzüglich MwSt und Versandkosten
Für Anzeigen gilt Preisliste Nr. 25 vom 1.1.2009
Erscheinungsweise: drei Hefte pro Jahr

Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages nicht gestattet, photographische Vervielfältigungen, Mikrofilme, Mikrophotos u.ä. von den Zeitschriftenheften, von einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen.

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.

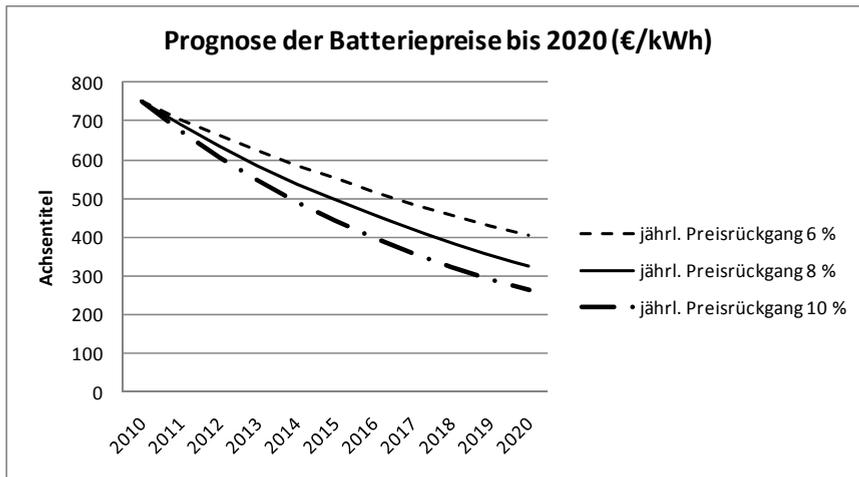


Abbildung 2: Prognose der Kostenverläufe für Batterien zwischen 2010 und 2020; Quelle: eig. Berechnungen. basierend auf BCG (2009). McKinsey (2009). Bundesregierung (2010)

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 egalisieren, bis 2020 auf 7.818 bzw. 12.639 km fällt.

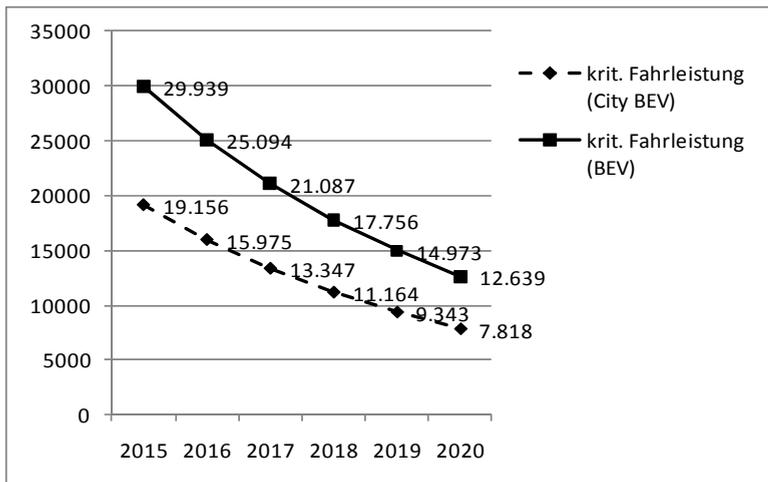


Abbildung 3: Entwicklung der kritischen Fahrleistung zwischen 2015 und 2020 am Beispiel des „best-case“ Szenarios; Quelle: eig. Berechnungen

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				130 \$/ Barrel				125 \$/ Barrel				115 \$/ Barrel			
	jährl. Bat.pr.entw.				- 10%/Jahr				- 9%/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				115 \$/ Barrel				105 \$/ Barrel				100 \$/ Barrel			
	jährl. Bat.pr.entw.				- 8%/Jahr				- 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.

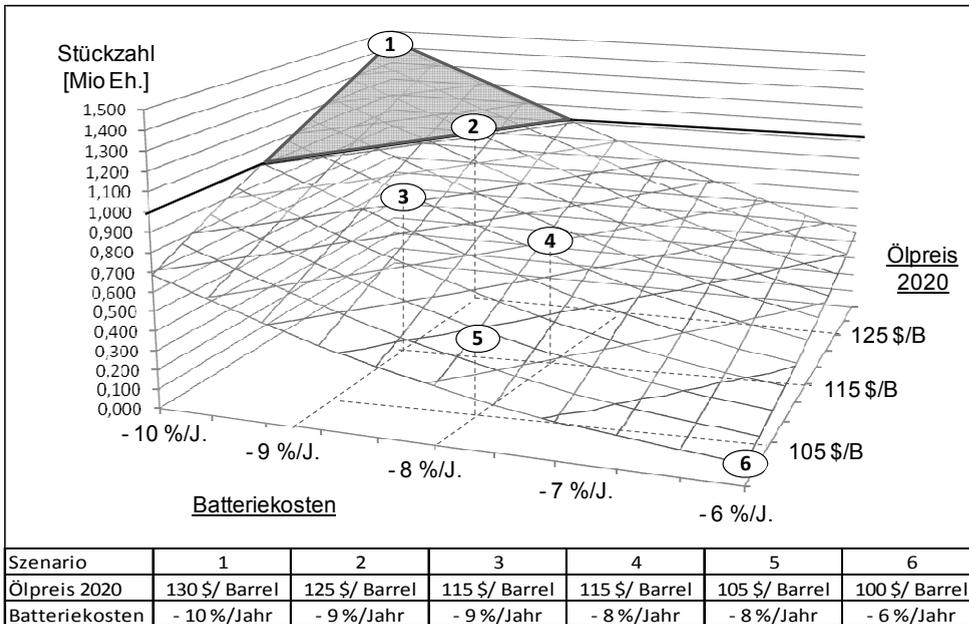


Abbildung 4: Überblick über Gesamtstückzahlen in 2020 für alle betrachteten Batteriekosten- [%/Jahr] und Ölpreisszenarien [\$/Barrel]; Quelle: eig. Berechnungen

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.

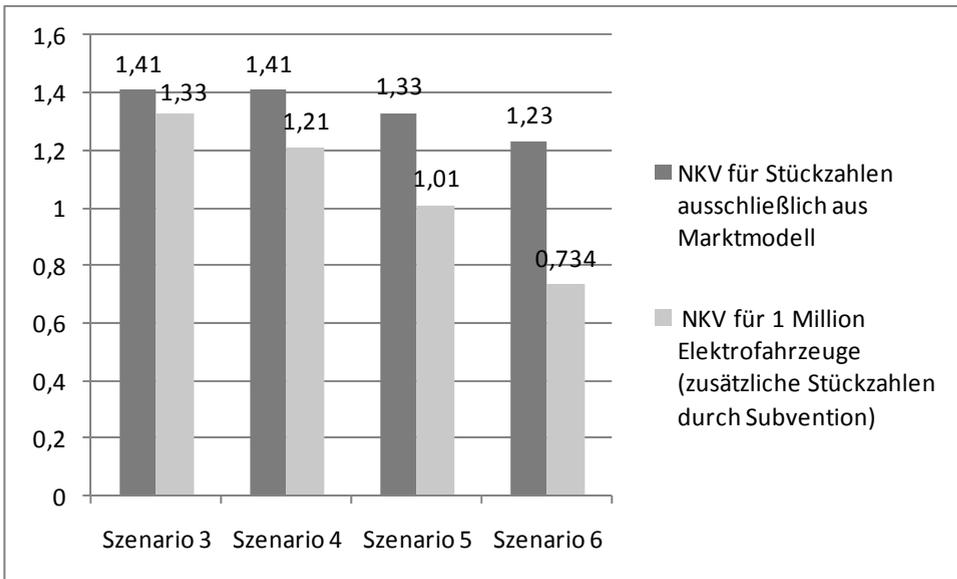


Abbildung 5: Vergleich der NKV jeweils mit und ohne Subvention durch Kaufzuschüsse;

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

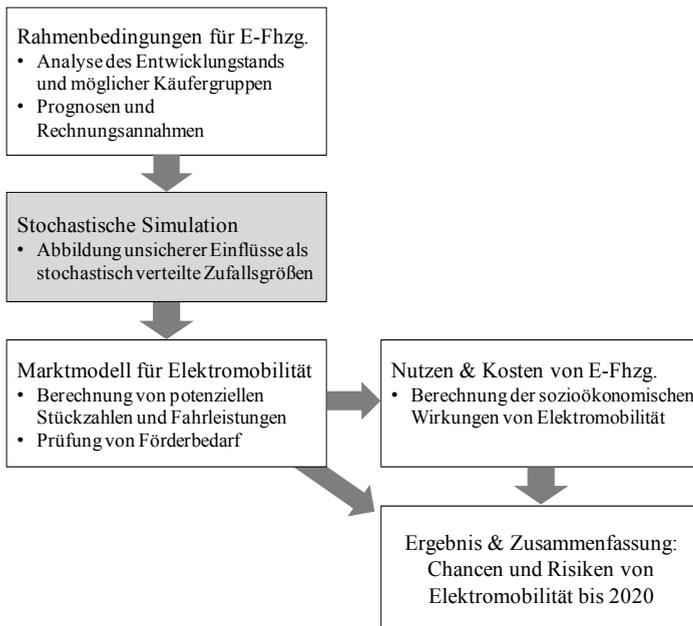


Abbildung 6: Bestimmung der Erfolgswahrscheinlichkeit der Marktdurchdringung bzw. der Nutzen und Kosten von Elektrofahrzeugen bis 2020 anhand von stochastischer Simulation

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.

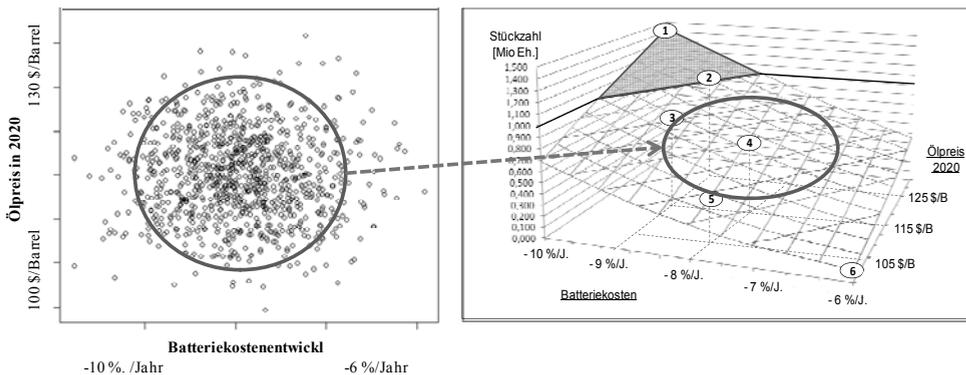


Abbildung 7 –links: Streuung der Wertepaare von 1.000 Szenarien aus Ölpreis- (Y-Achse) und Batteriekostenentwicklung (X-Achse); rechts: resultierende Gesamtstückzahl bis 2020 (Z-Achse); Quelle: eig. Berechnungen

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.

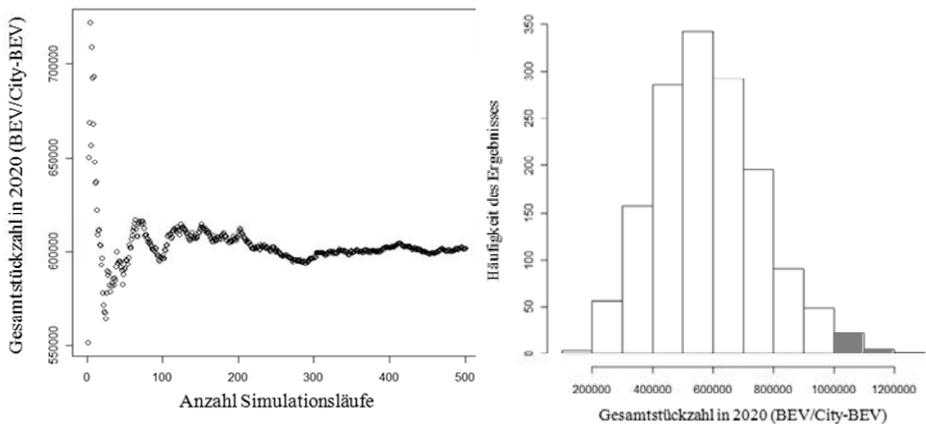


Abbildung 8: Stückzahlenergebnisse der stochastischen Marktsimulation bei a) $n = 500$ (fortlaufender Mittelwert) und b) $n = 1.000$ Simulationen (Streuung); Quelle: eig. Berechnungen

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

Die Transporte von Rohstoffen für die Stahlindustrie in der Rheinschifffahrt

VON NORBERT KRIEDEL, STRASSBURG

Inhalt

1. Einleitung und Problemstellung
2. Die Stahlindustrie im Einzugsgebiet des Rheins
3. Transporte von Erzen und Metallabfällen
4. Transporte von festen Brennstoffen
5. Zusammenfassung und Ausblick

1. Einleitung und Problemstellung

Auch auf Grund vorteilhafter naturräumlicher Bedingungen stellt der Rhein die bedeutendste deutsche und auch europäische Wasserstraße dar. So wurden auf dem klassischen Rhein¹ im Jahre 2008 207,5 Millionen Tonnen an Gütern befördert. Damit hat der Rhein einen Anteil von 84% an den Transporten auf allen deutschen Wasserstraßen.² Das Güterbeförderungsaufkommen auf der Donau, dem zweitwichtigsten Strom innerhalb der europäischen Binnenschifffahrt, betrug im Jahr 2005 insgesamt 69,9 Millionen Tonnen.³

Anschrift des Verfassers:

Dr. Norbert Kriedel
Zentralkommission für die Rheinschifffahrt
2, place de la Republique
67000 Strasbourg
Frankreich

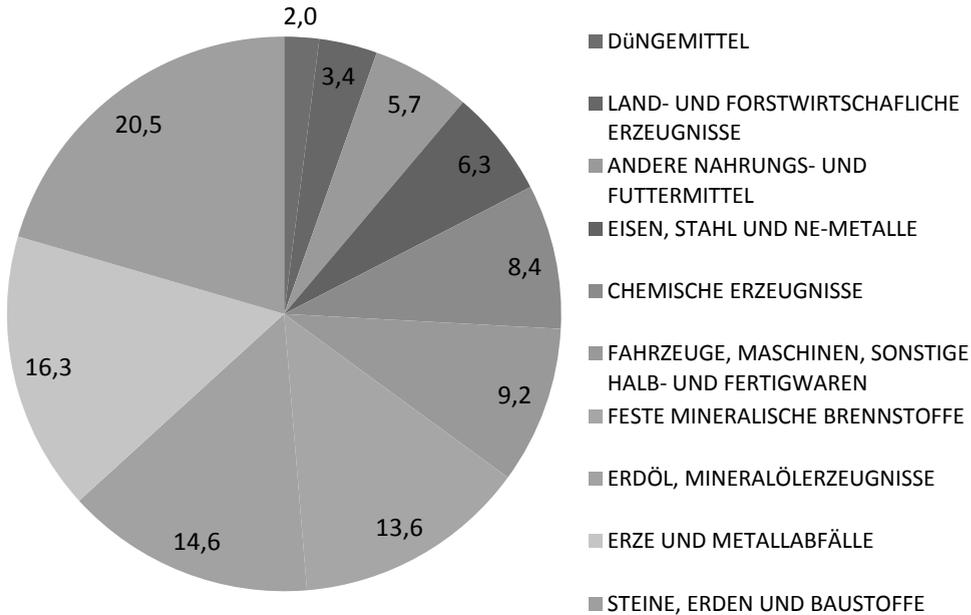
¹ Als Binnenschifffahrt auf dem Rhein (oder Rheinschifffahrt) wird im vorliegenden Artikel der Transport von Gütern für gewerbliche Zwecke auf dem ‚klassischen‘ oder ‚traditionellen‘ Rhein verstanden. Hierunter versteht man den Rheinabschnitt zwischen Rheinfelden bei Basel und der deutsch-niederländischen Grenze. Vgl.: ZKR (2009a), S. 23.

² Das Transportvolumen auf allen deutschen Wasserstraßen betrug im Jahre 2008 245,7 Mio. Tonnen. Vgl. Bundesamt für Güterverkehr (2009), S. 9. Beim Containertransport beträgt der Anteil des Rheins am deutschen Wasserstraßennetz sogar 92%. Vgl. Reim, U. (2009), S. 589.

³ Donaukommission (2007), S. 67.

Die Transporte von Erzen und Metallabfällen machten im Jahr 2008 zusammen 16,3 % aller Transporte in der Rheinschifffahrt aus, wie folgende Grafik zeigt. Feste mineralische Brennstoffe (zu rund 99 % Steinkohle) waren mit 13,6 % vertreten. Die oben genannten Rohstoffe werden vor allem bei der Stahlindustrie als Vorprodukte eingesetzt. Daneben hat auch die Energiewirtschaft einen Steinkohlebedarf.

Abbildung 1: Transporte in der Rheinschifffahrt nach Segmenten (%)



Quelle: ZKR, destatis

Bei Erzen, Schrott und Steinkohle handelt es sich um klassische Massenprodukte, bei denen die Binnenschifffahrt Wettbewerbsvorteile gegenüber Schiene und Straße aufweist. So führt die im Vergleich zu Bahnwagons und LKW größere Transportkapazität von Binnenschiffen zu Größenkostenvorteilen (Economies of Scale).

Die Rolle des Rheins als Verkehrsachse für die Stahlindustrie lässt sich daran ablesen, dass die Rheintransporte von Eisenerzen 99 % aller Eisenerztransporte auf deutschen Wasserstraßen ausmachen.⁴

⁴ ZKR (2009a), S. 35.

2. Die Stahlindustrie im Einzugsgebiet des Rheins

Von der gesamten Stahlherstellung innerhalb der EU-27 entfallen rund 48 %, also fast die Hälfte, auf die drei Länder Deutschland, Italien und Spanien.⁵ Die deutsche Stahlindustrie steht in einem engen geografischen und logistischen Verhältnis zum Rheinstromgebiet. Auch in Frankreich existiert zwischen den lothringischen Stahlwerken und der Mosel eine enge Beziehung. Weitere Länder, in denen die Stahlindustrie auf die Rheinschifffahrt in direkter oder indirekter Weise zurückgreift sind die Benelux-Länder Niederlande, Belgien und Luxemburg.

Ein großer Teil der deutschen Stahlindustrie befindet sich im Ruhrgebiet und an der Saar. Zwar ist der zahlenmäßige Anteil der dortigen Stahlwerke nicht übermäßig hoch, allerdings weisen vor allem die Stahlwerke im Ruhrgebiet die mit Abstand höchsten Produktionskapazitäten auf. Das saarländische Stahlrevier ist über die Mosel- und Saarschifffahrt mit dem Rhein verbunden.

Somit müssen Eisenerze, die in den ARA-Häfen anlanden und deren Ziel ein Stahlwerk im Saarland ist, zunächst auf dem Rhein befördert werden. Dasselbe gilt auch für die französischen Stahlstandorte in Lothringen, die entlang der Mosel lokalisiert sind. Die Stahlindustrie in Lothringen ist allerdings von einem tiefgreifenden Strukturwandel geprägt, der dazu führt, dass die Anlieferung von Kohle und Eisenerzen in Zukunft hier eher sinken dürfte.⁶

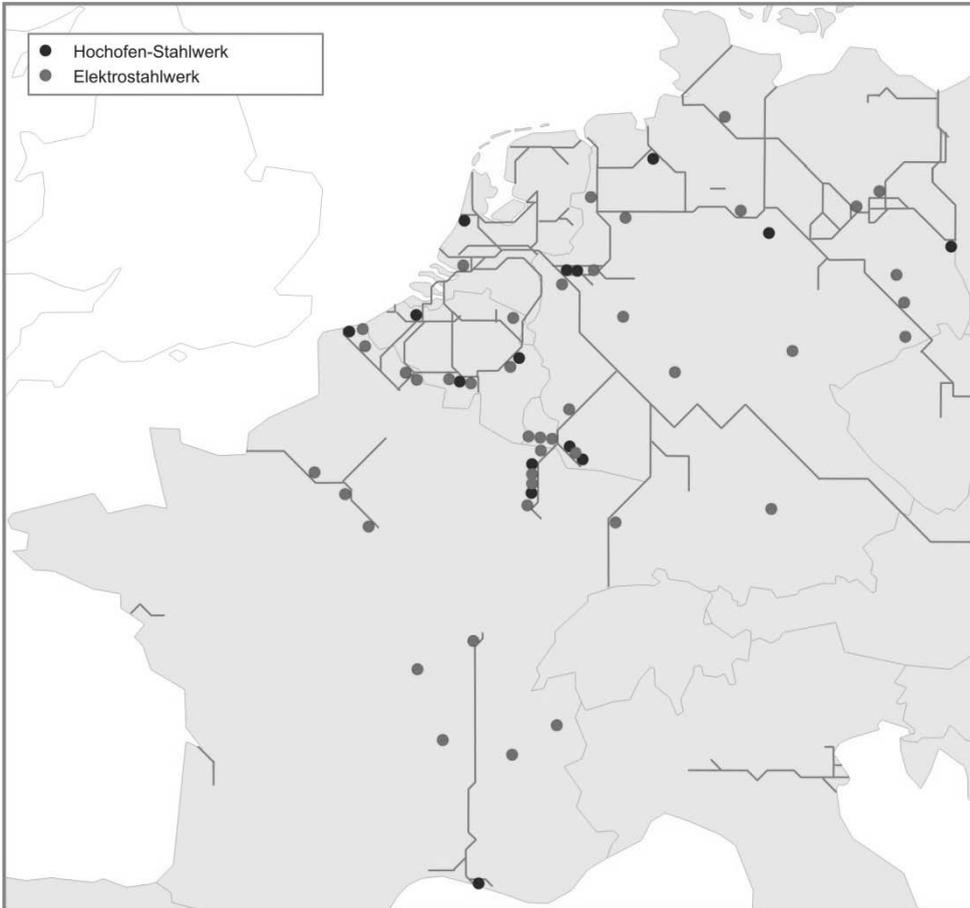
Auch die luxemburgische Stahlindustrie, die sich im Süden des Landes nahe der französischen Grenze befindet, greift zum Teil auf die Mosel als Verkehrsträger zurück.

Die Binnenschifffahrt in den Niederlanden und in Belgien ist von einem relativ dichten Kanalnetz geprägt, das in mannigfaltiger Verbindung zum Rhein steht. Die zahlreichen Stahlwerke in Belgien befinden sich vor allem im Süden des Landes, der über den Albert-Kanal mit dem Seehafen Antwerpen und über die Maas mit dem Rhein in den Niederlanden verbunden ist.

Einen Überblick über das Wasserstraßennetz und die Stahlwerke in Belgien, Frankreich, Deutschland, Luxemburg und den Niederlanden gibt die untenstehende Karte. In dieser erfolgt eine Unterscheidung nach Oxygen- und Elektrostaahlwerken.

⁵ Eurofer

⁶ Voies Navigables de France (2007), S. 2.

Abbildung 2: Westeuropäisches Wasserstraßennetz und Stahlwerke

Quellen : Zusammenstellung ZKR (2009a) nach Angaben von: Wirtschaftsvereinigung Stahl, Federation Francaise de l'Acier, Belgian Steel Federation (GSV), Eurofer.

Das Oxygen- und das Elektrostahlverfahren weisen deutliche Unterschiede im Rohstoffbedarf auf: Die historisch ältere Technologie (Oxygenstahl-Verfahren) verwendet als wichtigste Vorprodukte Eisenerze und Steinkohle. Hingegen wird beim Elektrostahlverfahren, das in jüngerer Zeit an Bedeutung gewonnen hat, auf Schrott zum Wiedereinschmelzen zurückgegriffen.

Die Marktanteile der beiden Verfahren sind für die oben genannten Länder in folgender Tabelle aufgelistet:

Tabelle 1: Aufteilung der Stahlerzeugung auf Produktionstechnologien (in %)

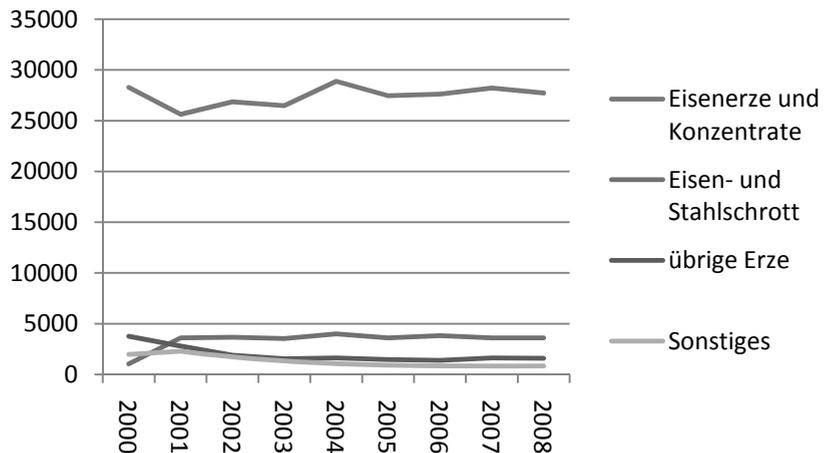
	Oxygenstahl	Elektrostahl
Deutschland	69	31
Frankreich	63	37
Belgien	75	25
Luxemburg	0	100
Niederlande	98	2

Quelle: Association Française de l'Acier, Eurofer, eigene Berechnungen

3. Transporte von Erzen und Metallabfällen

3.1 Allgemeine Struktur und mehrjährige Entwicklung

Im Jahr 2008 wurden 33,7 Mio. Tonnen Erze und Metallabfälle in der Rheinschifffahrt befördert. Damit hat der Rhein einen Anteil von 91 % aller Transporte dieses Segments im gesamten deutschen Wasserstraßennetz.⁷

Abbildung 3: Rheintransporte von Erzen und Metallabfällen

Quelle: destatis; Angaben in 1.000 Tonnen

Erze und Metallabfälle werden fast ausschließlich im Nord-Süd-Verkehr befördert. Dieser hatte im Jahr 2008 einen Anteil von 94 % am gesamten Transportaufkommen. Nur 6 % der Transporte erfolgten rheinabwärts (zu Tal).

⁷ Bundesamt für Güterverkehr (2009), S. 9.

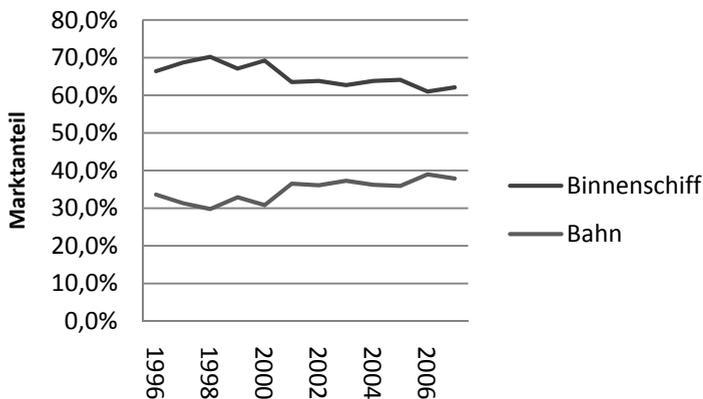
Das Überwiegen der Transporte „zu Berg“ spiegelt die Richtung der Importströme bei Erzen wider. So befinden sich innerhalb der Verkehrs-Kategorie ‚Empfang aus dem Ausland‘ Erze und Metallabfälle auf deutschen Wasserstraßen mengenmäßig auf Rang 1.⁸

Importe von Eisenerzen nach Mitteleuropa landen zu einem erheblichen Teil in den Seehäfen Rotterdam, Amsterdam, Antwerpen und Gent an. Das für die EU-27 wichtigste Herkunftsland von Eisenerz ist Brasilien, aus dem 54 % der Importe stammen. Weitere bedeutende Lieferländer sind Kanada (9 %) und Russland (8 %).⁹

3.2 Marktanteile der Binnenschifffahrt

Beim Abtransport von Importerzen in das Hinterland spielt der Rhein als Verkehrsachse eine wichtige Rolle. In der deutschen Stahlindustrie liegt der Modal-Split-Anteil der Binnenschifffahrt beim Bezug von Eisenerzen bei 62%, für Stahlschrott bei 21%.

Abb. 4: Modal Split Anteile der Verkehrsträger in der deutschen Stahlindustrie: Erze



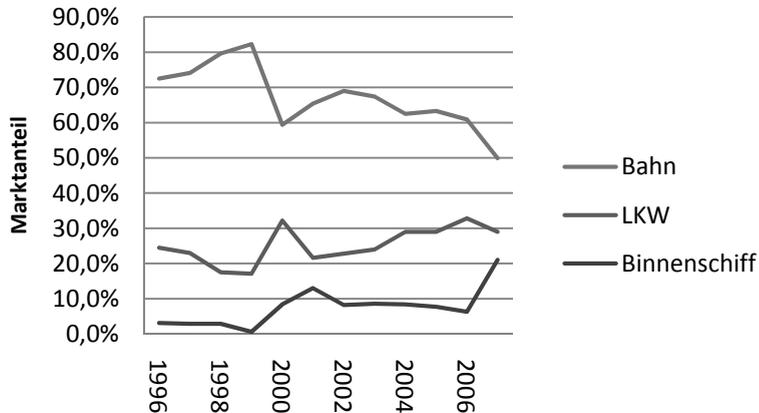
Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl; Es werden keine Erze per LKW befördert.

Bei der Anlieferung von Erzen hat sich der Marktanteil der Wasserstraße seit Ende der 1990er Jahre leicht rückläufig entwickelt.

⁸ Winter, H. (2009), S. 691.

⁹ ZKR (2009a), S. 34.

Abb. 5: Modal Split Anteile der Verkehrsträger in der deutschen Stahlindustrie: Stahlschrott



Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl

Die jüngsten Marktanteilsgewinne der Wasserstraße bei Schrott sind wohl vor allem auf die starken Preiserhöhungen bei Schrott in den Jahren 2006 und 2007 zurückzuführen. Durch die Wahl des kostengünstigen Verkehrsträgers Binnenschifffahrt konnten hohe Schrottpreise durch relativ niedrige Transportkosten kompensiert werden.

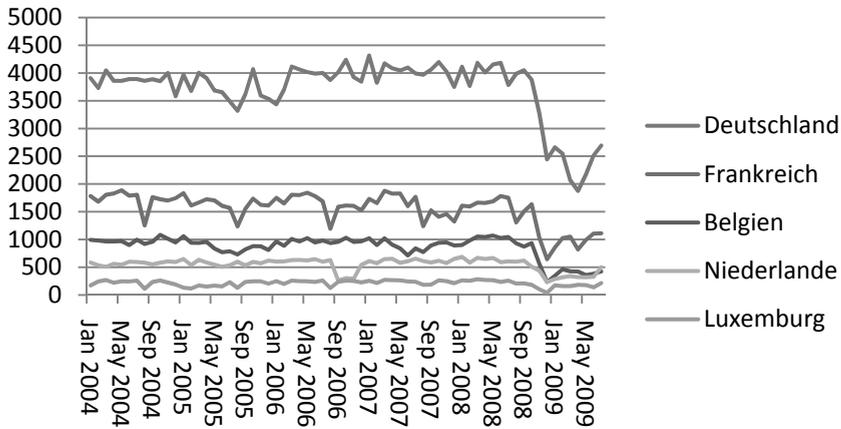
3.3 Auswirkungen der Wirtschaftskrise auf die Transporte

Im Zuge der sich gegen Ende des Jahres 2008 ausbreitenden Wirtschafts- und Finanzkrise hat sich die Nachfrage nach Stahl in zahlreichen Industriezweigen, darunter vor allem in der Automobilindustrie, erheblich reduziert. Bei der Rohstahlproduktion kam es daraufhin etwa ab September 2008 zu enormen Einbrüchen.

Im Laufe des ersten Halbjahrs erholte sich die Stahlproduktion zwar leicht, allerdings lag die Produktion immer noch erheblich unter dem Vorjahresniveau. So war die Stahlproduktion in Deutschland im ersten Halbjahr 2009 noch um 43,3 % geringer als im Vorjahreszeitraum 2008. In Frankreich war die Differenz mit 41,5 % ähnlich hoch, in den Niederlanden (50,1 %) und in Belgien (60,5 %) sogar noch ausgeprägter.

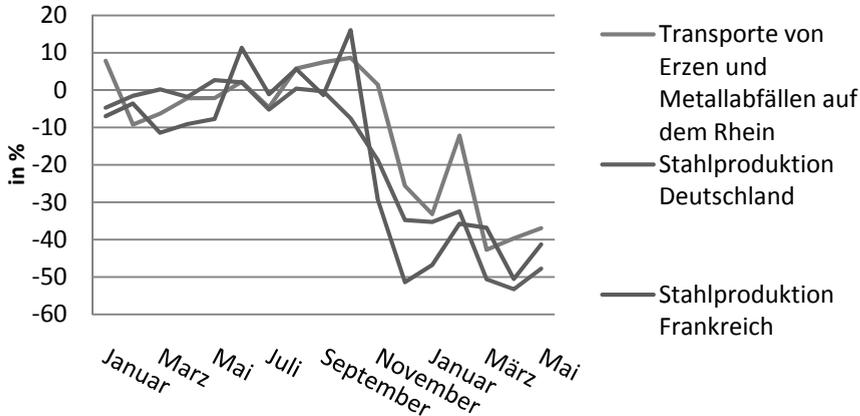
Der gewaltige Einbruch der Produktion ist nicht ohne Folgen für die Umschlagsentwicklung in den Häfen und die Transportentwicklung in der Binnenschifffahrt geblieben. Der Rückgang bei den Erzimporten war außerordentlich. Im Seehafen Rotterdam war bei der Einfuhr von Erzen im ersten Halbjahr 2009 ein Minus von 65,6 % gegenüber dem Vorjahreszeitraum festzustellen. In Antwerpen ergab sich ein ähnlich starker Rückgang um 61,4 %.¹⁰

¹⁰ Port of Rotterdam; Port of Antwerp

Abbildung 6: Rohstahlproduktion in Ländern des Rheineinzugsgebiets

Quelle: Eurofer; Angaben in Tsd. metrischen Tonnen

Die Transporte von Erzen und Metallabfällen fielen auf deutschen Wasserstraßen bis Mai um 39 % gegenüber dem Vorjahr.¹¹ Einen Eindruck von der engen Beziehung zwischen Stahlproduktion und Beförderungsnachfrage bei Erzen und Metallabfällen gibt folgendes Schaubild.

Abbildung 7: Entwicklung der Stahlproduktion in Deutschland und Frankreich sowie der Transporte von Erzen und Metallabfällen auf dem Rhein (Januar 2008–Mai 2009)

Quelle: destatis, Eurofer, eigene Berechnungen; Veränderungsdaten gegenüber Vorjahresmonat in %

¹¹ Aufgrund statistischer Probleme sind für das Jahr 2009 monatliche Werte für die Rheinschifffahrt derzeit nicht verfügbar.

In obigem Schaubild ist zum einen die monatliche Änderungsrate der Rohstahlproduktion in Deutschland und Frankreich gegenüber dem Vorjahr abgebildet. Zum anderen findet sich in der Grafik die entsprechende Änderungsrate der Transporte von Erzen und Metallabfällen auf dem Rhein. Die starke Korrelation zwischen den genannten Raten ist augenscheinlich.

4. Transporte von festen Brennstoffen

4.1 Allgemeine Struktur und mehrjährige Entwicklung

Im Jahr 2008 hatten feste Brennstoffe einen Anteil von 13,6 % an den gesamten Transporten in der Rheinschifffahrt. Die Transporte fester Brennstoffe bestehen zu über 99 % aus Steinkohle. Außerdem werden noch Steinkohlenbriketts sowie Braunkohle – letztere allerdings in verschwindend geringen Mengen – befördert.

Wie der Erztransport so erfolgt auch der Transport fester Brennstoffe zum überwiegenden Teil rheinaufwärts, also von Nord nach Süd. Von der gesamten beförderten Menge fester Brennstoffe (28,3 Mio. Tonnen)¹² wurden im Jahr 2008 97,4 % zu Berg, also stromaufwärts transportiert. Nur 2,6 % wurden in entgegengesetzter Richtung (zu Tal) befördert. Diese Aufteilung ist vergleichbar mit den Transportrelationen bei Erzen und Metallabfällen (94 % zu Berg versus 6 % zu Tal).

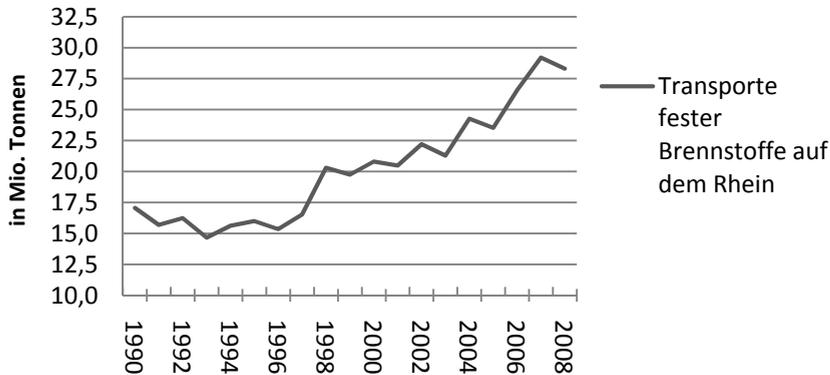
Die Gründe für das Überwiegen der Nord-Süd-Richtung hängen mit der Richtung der Importströme zusammen. Sowohl der Erztransport als auch die Beförderung von Steinkohle stehen in enger Beziehung zu den Importen dieser Rohstoffe aus Übersee.

Die Nachfrage nach Steinkohle geht neben der Stahlindustrie auch vom Energiesektor aus, der sogar für einen deutlich höheren Anteil der Importe verantwortlich ist.¹³ Insgesamt hat sich der Transport fester Brennstoffe in den letzten Jahren merklich erhöht. Wurden im Jahre 1990 noch rund 17 Mio. Tonnen befördert, so war das Beförderungsvolumen im Jahr 2008 bereits um rund 10 Mio. Tonnen gestiegen, auf 28,3 Mio. Tonnen.

Die Gründe für diesen Anstieg liegen in strukturellen Veränderungen beim Verhältnis zwischen Importen und inländischer Förderung von Steinkohle. Diese Veränderungen werden im folgenden Kapitel eingehend beleuchtet.

¹² Dies entsprach im Jahr 2008 rund 82 % der Transporte von festen Brennstoffen auf allen deutschen Wasserstraßen. Vgl.: Bundesamt für Güterverkehr (2009), S. 9.

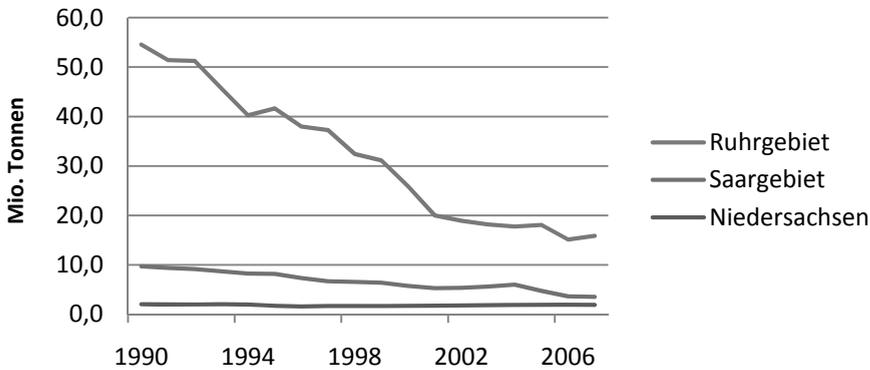
¹³ ZKR (2009a), S. 37

Abbildung 8: Transporte fester Brennstoffe* auf dem Rhein

Quelle: destatis; * der Anteil der Steinkohle an diesen Transporten beträgt rund 99 %.

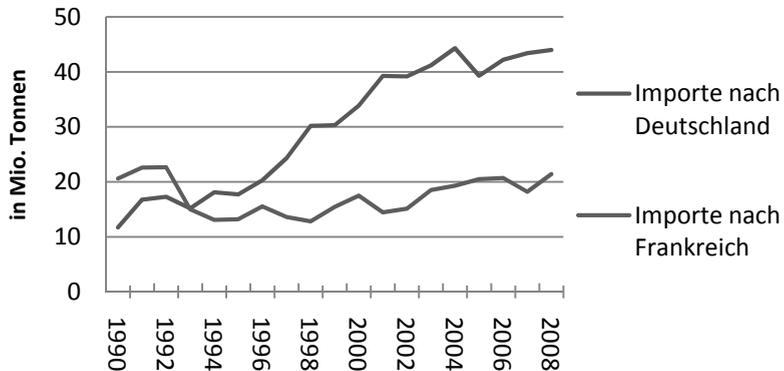
4.2 Inländische Förderung und Importe von Steinkohle – Folgen für die Rheinschifffahrt

Der Steinkohlebedarf eines Landes lässt sich grundsätzlich durch inländische Förderung oder durch Importe abdecken. Die inländische Förderung von Steinkohle ist in Westeuropa stark rückläufig. Die heimische Kohlegewinnung ist zwischen 1990 und 2008 von über 50 Mio. Tonnen auf unter 20 Mio. Tonnen gesunken.

Abbildung 9: Inländische Förderung von Steinkohle in Deutschland

Quelle: Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.

Angeht die sinkende heimische Förderung muss der Kohlebedarf der Stahlindustrie und der Energiewirtschaft in zunehmendem Maße durch Importe abgedeckt werden. Dies ist der Grund für einen ansteigenden Trend bei Importen von Steinkohle, wie er für mehrere westeuropäische Länder festzustellen ist.

Abbildung 10: Steinkohlen-Importe Deutschlands und Frankreichs

Quelle: VDKI (1993-2009), Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.

Die Steinkohlenimporte Deutschlands sind zwischen den Jahren 1990 und 2008 von 11,7 Mio. Tonnen auf 44 Mio. Tonnen gestiegen. Auch in Frankreich haben sie sich im genannten Zeitraum erhöht.

Die Eisen- und Stahlherstellung spielt für die deutschen Kohleimporte nur die zweitwichtigste Rolle. Die größte Importnachfrage geht von der Energiewirtschaft aus, welche die Importkohle zur Strom- und Wärmegewinnung nutzt.¹⁴

Ein Teil der Steinkohlenimporte gelangt über den Seeweg nach Deutschland und landet in deutschen Seehäfen wie Hamburg oder Bremen an. Im letzten Jahr gelangten auf diesem Wege 14,7 Mio. Tonnen Steinkohle nach Deutschland.¹⁵ Wie das vorherige Kapitel gezeigt hat, ist aber die aus den ARA-Häfen kommende und auf dem Rhein ins Hinterland beförderte Steinkohle (28,3 Mio. Tonnen) fast doppelt so hoch.

Die folgende Abbildung zeigt die Disparität zwischen dem sinkenden Gesamtbedarf an Steinkohle in Deutschland (berechnet aus der Summe von Importen und inländischer Förderung) einerseits und den Transporten in der Rheinschifffahrt andererseits.

Obwohl die Summe aus inländischer Förderung und Importen von Steinkohle rückläufig ist – was an der stark abnehmenden Förderung liegt – konnte die Binnenschifffahrt ihre Transportmenge erhöhen, da sich das Verhältnis aus Importen und Förderung zu ihren Gunsten verschoben hat. So sind Importe wesentlich transportintensiver¹⁶ als eine inländische

¹⁴ VDKI (1993-2009)

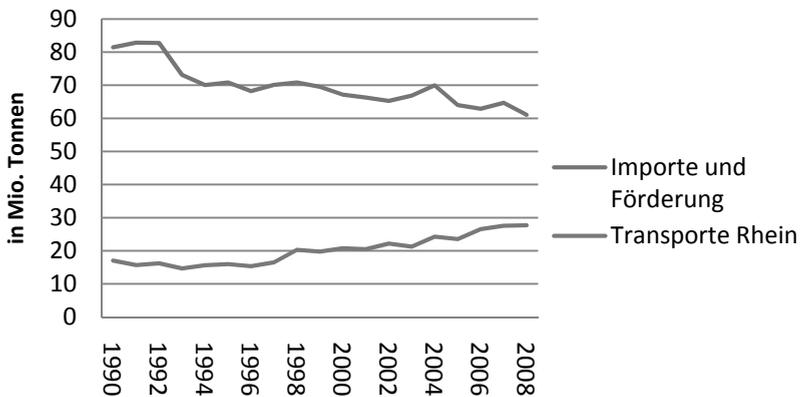
¹⁵ ZKR (2009c), S. 59

¹⁶ Transportintensität wird hierbei als das Verhältnis von beförderter Kohle zum Kohleaufkommen (= inländische Kohleförderung bzw. Kohleimporte) verstanden. Wird die eigene Kohleförderung mehr und mehr durch Importe verdrängt, so führt dies zu einer höheren Transportintensität bei Kohle. Diese Definition unterscheidet

Förderung, da Letztere zumeist im engen geografischen Umfeld der Stahlindustrie angesiedelt ist (Ruhrgebiet bzw. Saarland).

Insgesamt lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die steigenden Importe, die zu einem erheblichen Teil in den niederländischen und belgischen Seehäfen anlanden, zu einem Aufwärtstrend bei der Beförderung von Steinkohle auf dem Rhein geführt haben. Dieser Aufwärtstrend wurde durch einen steigenden Modal Split Anteil der Binnenschifffahrt beim Transport von festen Brennstoffen verstärkt.

Abbildung 11: Gesamtbedarf in Deutschland sowie Transporte von Steinkohle auf dem Rhein*

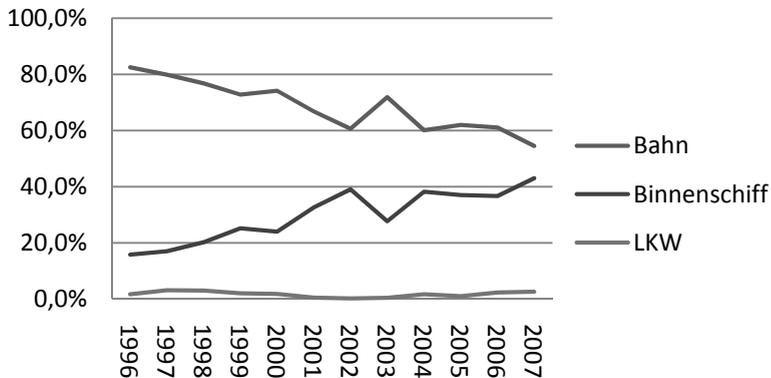


Quelle: destatis; Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.; VDKI (1993-2009); eigene Berechnungen; * Gesamtbedarf = Importe und Förderung von Steinkohle

4.3 Marktanteil der Binnenschifffahrt

In Deutschland, dem Land mit der größten Stahlerzeugung innerhalb der EU-27, liegt der Modal-Split-Anteil der Binnenschifffahrt beim Bezug von Steinkohle bei 43%. Die Binnenschifffahrt hat bei der Steinkohle seit 1996 an Bedeutung gewonnen, wie folgende Abbildung zeigt.

sich von einem anderen, in den Verkehrswissenschaften gebräuchlichen Verständnis von Transportintensität. So verwendet Baum (2000) als Maß für Transportintensität das Verhältnis aus Transportkilometern zu Bruttoinlandsprodukt. Vgl. Baum (2000), S. 80.

Abb. 12: Modal Split Anteil der Verkehrsträger in der deutschen Stahlindustrie: Steinkohle*

Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl * Koks-kohle und Koks

Der Straßenverkehr hat bei der Beförderung von Kohle generell eine sehr geringe Bedeutung. Dies liegt an den Kostenvorteilen, die sich beim Kohletransport durch Schiene und Wasserstraße ergeben.¹⁷

Der steigende Marktanteil der Wasserstraße hat auch zu dem insgesamt zunehmenden Trend bei den Transporten beitragen, neben den oben analysierten strukturellen Verschiebungen im Verhältnis zwischen Importen und inländischer Förderung.

4.4 Auswirkungen der Wirtschaftskrise auf die Transporte

Die Transporte fester Brennstoffe stiegen auf deutschen Wasserstraßen von Januar bis Mai 2009 insgesamt um 1,6 % gegenüber dem Vorjahr.¹⁸ Das Segment der festen Brennstoffe zählte damit neben dem Mineralölsegment zu jenen Bereichen, die von der Wirtschafts- und Finanzkrise weitgehend verschont blieben. Die Ursachen hierfür sind in verschiedenen Faktoren zu suchen.

Neben dem oben untersuchten Aufwärtstrend bei den Transporten von Steinkohle spielte der strenge Winter 2008/2009, der einen vermehrten Bedarf an Kesselkohle in der Energiewirtschaft nach sich zog, eine weitere Rolle.

¹⁷ Vgl. hierzu: Ekmann, J.M.; Le, P.E. (2004), S. 551.

¹⁸ Bis April betrug das Plus sogar 7,6 %.

So ist der Energieverbrauch zwar bis zu einem gewissen Grade von der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung abhängig.¹⁹ Eine nach wie vor große Rolle für den Energieverbrauch spielen aber klimatische Einflüsse, vor allem kalte und lang anhaltende Winter.²⁰

5. Zusammenfassung und Ausblick

Zwischen der Beförderung von Erzen und Metallabfällen auf dem Rhein und der Produktionsentwicklung in der deutschen und französischen Stahlindustrie zeigt sich eine sehr enge Beziehung. Diese Relationen gründen sich auf wirtschaftsgeografischen Faktoren. Von entscheidender Bedeutung sind hier die hohe Konzentration der Stahlproduktion an den Flüssen Rhein, Saar und Mosel sowie die enge Beziehung zwischen den niederländischen und belgischen Seehäfen einerseits und der Rheinschifffahrt andererseits.

So befinden sich große deutsche Stahlwerke, die auf Eisenerze als Rohstoffe angewiesen sind, an den Flüssen Rhein und Saar. Ein nach wie vor wichtiger Teil der französischen Stahlindustrie ist entlang der lothringischen Mosel lokalisiert. Transporte von Erzen auf Mosel und Saar setzen meist eine vorherige Beförderung auf dem Rhein voraus, was an den stromaufwärtsgerichteten Importströmen bei Erzen liegt. So wird ein Großteil der Erzimporte in den ARA-Häfen abgewickelt und per Binnenschiff auf dem Rhein ins europäische Hinterland befördert.

Die gegen Ende des Jahres 2008 einsetzende Wirtschafts- und Finanzkrise hat zu einem erheblichen Rückgang der Stahlproduktion geführt. In deren Folge hat es auch bei den Transporten von Erzen und Metallabfällen dramatische Einbrüche gegeben. Eine Zunahme der Transporte ist an eine Wiederaufrichtung der Industrieproduktion geknüpft, die etwa ab dem Frühjahr 2009 eingesetzt hat.

Einen weiteren wichtigen Rohstoff für die Stahlerzeugung stellt die Steinkohle dar. Für dieses Transportsegment ist ein mehrjähriger Zuwachs zu registrieren, der im Gegensatz steht zu dem sinkenden inländischen Steinkohlebedarf. Für diese Divergenz in der Entwicklung existieren im Wesentlichen drei Gründe:

- Strukturelle Änderungen bei der Bedarfsdeckung (steigender Anteil der Importe, sinkende inländische Förderung)
- Höhere Transportintensität von Importen
- Steigender Modal-Split-Anteil der Binnenschifffahrt beim Transport von Steinkohle für die Stahlindustrie

¹⁹ Allerdings nimmt der Grad an Abhängigkeit seit längerer Zeit ab. Dies liegt vor allem an den vermehrten Anstrengungen zum Energiesparen sowie Effizienzsteigerungen im Energieeinsatz. Vgl. Baum (2000), S. 77f.; Horn, M.; Wernicke, I.; Ziesing, H.-J. (2007), S. 107f.

²⁰ Auch die Importe von Kesselkohle der deutschen Kraftwerke zur Energieversorgung stiegen bis Juli 2009 um 8,6 % gegenüber dem Vorjahreszeitraum. Vgl.: VDKI (1993-2009)

Es bestehen Anzeichen, dass der aufwärts gerichtete Trend bei den Kohletransporten mittelfristig anhalten wird. Dies folgt aus der sich weiter rückläufig entwickelnden inländischen Kohleförderung, die zu einer weiteren Zunahme der Importe führen wird. Für Deutschland ist eine Verdrängung der auf Erze und Kohle angewiesenen Oxygen-Stahlproduktion derzeit nicht erkennbar. So wurden in jüngster Zeit Investitionen in die Oxygen-Stahlerzeugung (Ausbau der Produktionskapazitäten in Duisburg getätigt).²¹

Im Übrigen ist davon auszugehen, dass angesichts des sehr zeitintensiven Ausbaus der erneuerbaren Energien - deren Beitrag zur Energieversorgung zwar stetig zunimmt aber bei weitem (noch) nicht ausreicht um den Anteil der konventionellen Energieträger zu ersetzen - die Steinkohle bis auf weiteres auch ein Bestandteil im deutschen Energiemix bleiben wird. Dies wird sich förderlich auf die Transporte in der Binnenschifffahrt auswirken.²²

Abstract

The steel industry in Western Europe is dependent on imports of raw materials, especially iron ores, metal wastes and hard coal. A large part of these resources arrive in the Dutch and Belgian seaports Rotterdam, Antwerp, Amsterdam and Gent. Inland waterway transport plays an important role for the distribution of these goods to the steel industry in the European hinterland. The modal share of barge traffic is especially high for the delivery of iron ores, but has also risen for metal wastes (scrap). The transports of ores and scrap have been seriously hit by the economic recession that started at the end of the year 2008. However, the shipment of hard coal resisted to the crisis, due to climatic effects and an overall upward trend of coal transports in inland navigation. Since more than ten years, inland navigation is increasing its market share in the provisioning of the German steel plants with hard coal. In addition to the gains in market share, barge traffic benefits from structural shifts within the relationship between coal imports and coal production. The decrease of coal production in Western Europe leads to an upward trend in imports, which contributes to the rising trend in coal transports on the Rhine.

Literaturverzeichnis

Baum, H. (2000), Transport Intensity, Decoupling and Economic Growth, in: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 71(2), S. 77-101.

Bundesamt für Güterverkehr (2009), Marktbeobachtung Güterverkehr. Jahresbericht 2008

Donaukommission (2007); Statistisches Jahrbuch der Donaukommission für das Jahr 2005, Budapest (2007)

Ekman, J.M.; Le, P.H. (2004), Coal Storage and Transportation, in: Encyclopedia of Energy, Volume 1, S. 551-580.

²¹ ZKR (2009a), S. 37.

²² Der Anteil von Steinkohle am Energieverbrauch ist in Deutschland relativ stabil. So betrug der Anteil im Jahr 2007 24,5%, im Vergleich zu 23,8 % im Jahr 1990. Vgl. hierzu: Arbeitskreis Energiebilanzen.

- Horn, M.; Wernicke, I.; Ziesing, H.-J. (2007), Primärenergieverbrauch in Deutschland nur wenig gestiegen, in: DIW-Wochenbericht, Nr. 8/2007, 74. Jahrgang, 21.02.2007
- Reim, U. (2009), Kombiniertes Verkehr 2007, in: Wirtschaft und Statistik 6/2009
- Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. (2008), Der Kohlenbergbau in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 2007, Essen und Köln, November 2008
- Verein deutscher Kohleimporteure, VDKI (1993-2009), Jahresberichte 1992-2009. Fakten und Trends. Hamburg 1992-2009
- Voies Navigables de France, VNF (2007), La lettre économique No. 12, 1er trimestre 2007
- Winter, H. (2009), Binnenschifffahrt 2008, in: Wirtschaft und Statistik 7/2009
- Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, ZKR (2009a), Europäische Binnenschifffahrt. Marktbeobachtung 2008-1, Strasbourg Februar 2009
- Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, ZKR (2009b), Europäische Binnenschifffahrt. Marktbeobachtung 2009-1, Strasbourg Oktober 2009

Online-Datenquellen

- Arbeitskreis Energiebilanzen (<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=6>)
- Belgian Steel Federation (GSV) (<http://www.steelbel.be/EN/liens.htm>)
- Destatis (2009) (<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/>)
- Eurofer (European Confederation of Iron and Steel Industries) (<http://www.eurofer.org/>)
- Federation Française de l'Acier (FFA) (<http://www.ffa.fr/>)
- Port of Rotterdam (<http://www.portofrotterdam.com/de/home/>)
- Port of Antwerp (<http://www.portofantwerp.com/>)
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (<http://www.stahl-online.de/>)

Elektromobilität: Brennstoffzelle mit Wasserstoff¹

VON GOTTFRIED ILGMANN, BERLIN

1. PKW mit Brennstoffzelle: der HydroGen4

Wer auf dem Brennstoffzellenkongress „f-cell“ letztes Jahr in Stuttgart das Brennstoffzellenauto HydroGen4 von Opel Probe fuhr, fragt sich, warum dieses Auto eine Vision sein soll. Der *Softroader* der Mittelklasse, ein Zwitter zwischen Pkw und **Sport Utility Vehicle** (SUV), bezieht 93 Kilowatt aus seiner Brennstoffzelle und weitere 35 Kilowatt aus einem als Puffer dienenden Nickel-Metallhydrid-Akku (Energieinhalt: 1,8 Kilowattstunden). Von den knapp 130 Kilowatt Bruttostrom kommen letztlich etwa 100 Kilowatt als mechanische Leistung auf die Antriebsräder. Charakteristisch für Elektroantrieb: Ob die Drehzahl hoch oder bei Null liegt, es steht die volle Leistung zur Verfügung. So beschleunigt der Zweitonner in 12 Sekunden auf 100 Kilometer pro Stunde, sehr viel flinker als mit Benzinmotor oder Turbodiesel bei gleicher Leistung. Die Höchstgeschwindigkeit von 160 Kilometer pro Stunde kann ohne Stromentnahme aus dem Akku gehalten werden. Die Drucktanks fassen bei 700 bar (!) 4,2 Kilogramm Wasserstoff, ausreichend für eine 320 Kilometer lange Fahrstrecke. Mehr Reichweite durch mehr Drucktanks steht nichts im Wege. Der HydroGen4 basiert auf dem Chevy Equinox, einem in den USA marktgängigen Softroader von General Motors.²

Anschrift des Verfassers:
Dr.-Ing. Gottfried Ilgmann
Habersaathstraße 36 B
10115 Berlin

¹ Teile dieses Aufsatzes erschienen in der Rubrik ‚Wissenschaft‘ der Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung vom 10. Januar 2010, S. 48 und 51.

² Der Brennstoffzellen-Abkömmling ist rund 10 Prozent schwerer. Von vornherein als Brennstoffzellen-Fahrzeug konzipiert, wäre er etwa gleich schwer. Vorgestellt wurde der HydroGen4 erstmals auf der Internationalen Automobilausstellung im September 2007 in Frankfurt. Ein Jahr später wurde er zur Erprobung ausgeliefert. Das beste state of the art - Brennstoffzellen-Auto der Welt soll gegenwärtig der Honda FCX Clarity sein, so ein unabhängiger Fachmann (Reinhold Wurster von der Ludwig-Bölkow Systemtechnik (LBSt), der sowohl das Honda- als auch das Opel-Fahrzeug getestet hat. Der FCX Clarity ist ein sogenanntes Purpose Design Vehicle – also ein Fahrzeug das von Grund auf als Brennstoffzellen-Fahrzeug konstruiert wurde. Es ist der Designgeber des heutigen Honda Insight.

2. Die Akku-Konkurrenz: der Opel Ampera

Nächstes Jahr kommt in Europa der Opel Ampera an den Markt.³ Er ist vom Gewicht (1,8 Tonnen) und der Leistung (111 Kilowatt) dem HydroGen 4 vergleichbar. Das gilt auch für die Höchstgeschwindigkeit. Sie ist bei 160 Kilometer pro Stunde abgeregelt, um eine zu schnelle Entladung des Akku zu vermeiden. Bis zu einer Strecke von 60 Kilometer zieht der Elektromotor seinen Strom aus einem 180 Kilogramm schweren Lithium-Ionen-Akku, der 16 Kilowattstunden an der heimischen Steckdose „tanken“ kann. Um aber eine wirtschaftliche Lebensdauer des Akku zu garantieren (10 Jahre und mindestens 240 000 Kilometer) wird er nur bis zur Hälfte entladen und dann wieder binnen dreier Stunden aufgeladen. Die nutzbare Speicherenergie beträgt also nur 8 Kilowattstunden. Wer sollte eine solche Renn-Reise-Limousine mit 60 Kilometer Reichweite kaufen? Als „Nur-Stadtauto“ überdimensioniert und für weite Fahrten untauglich! Deshalb hat Opel in den Ampera einen so genannten *Range Extender* eingebaut, ein Zusatzaggregat, das bei Bedarf die Reichweite verlängert. Es ist ein 55 Kilowatt Corsa-Motor, der über einen Generator Strom für den Elektroantrieb erzeugt. Im Fachjargon wird dieses Konstrukt als „serieller Hybrid“ bezeichnet, Spötter nennen es „Elektroauto mit Notstromaggregat“. Vielleicht ist der Spott unangebracht, denn Gherardo Corsini, Entwicklungsingenieur bei Opel, weiß „wie beklemmend die Sorge vor einem leeren (Strom-) Tank sein kann“ und „dass 80 Prozent der Europäer täglich nicht mehr als 50 Kilometer fahren“⁴, die Reichweite von 60 Kilometern an vier von fünf Tagen also völlig ausreichend ist. Ein weiteres Kalkül: Der Markt für Nur-Stadtautos ist gering. Ein Vielfaches so groß ist er für Autos, die auch gelegentlich weiter fahren können – insbesondere dann, wenn sich ein Haushalt nur einen Pkw leisten will oder kann.

3. Gewohnte Reichweite aus Pkw mit Akku: Gewichtsexplosion

Müsste der Opel Ampera 320 Kilometer weit von Akkustrom zehren, wöge der Speicher etwa eine Tonne. Der Zwei- würde zum Dreitonner. Dadurch würde wiederum die Reichweite sinken oder es müsste ein noch schwererer Akku eingesetzt werden, denn eine Tonne Mehrgewicht erhöht den Rollwiderstand (proportional zum Gewicht). Auch steigt der Energieaufwand zur Beschleunigung der Fahrzeugmasse.⁵ Der Akku-Dreitonner wäre auf nicht absehbare Zeit unbezahlbar, die normale Steckdose für den Ladestrom nicht brauchbar. Ein Durchbruch in der Akkutechnik könnte alles ändern, aber die Skepsis ist groß. Tapfer wird das Ziel proklamiert, die speicherbare Energiemenge pro Kilogramm Akku-

³ In den USA wird dieses Fahrzeug noch in 2010 als Chevrolet Volt auf den Markt kommen.

⁴ Spiegel online, 4.09.2009 von Tom Grünweg.

⁵ Nur ein Teil davon kann beim Bremsen wieder gewonnen werden, wenn der Elektromotor als Generator fungiert, der den Akku lädt (Rückspeisung).

Gewicht von derzeit knapp 100 auf 200 Wattstunden anzuheben – ein höchst ambitioniertes Ziel angesichts der Grenzen, die die Natur setzt.⁶ Wird es erreicht, wäre das von den Kosten her noch nicht einmal ein entscheidender Durchbruch. Ist damit der Elektro-Pkw mit Akku (ohne „Notstromaggregat“) entgegen aller verbreiteter Hoffnung schon am Ende? Ja, wenn an ihn der Anspruch wie an die Alleskönner von Benzin- und Diesel-Pkw gestellt wird! Seine Stärke hat der Akku-Pkw bei folgenden Anforderungen: 1. geringe Reichweite 2. geringe Fahrzeugmasse 3. überwiegend Stop-and-Go-Zyklus. Diese Kombination trifft auf das Nur-Stadtauto zu. Größte Vorteile verspricht der Elektroantrieb aus einem Akku beim Fahrrad, denn da sind alle Anforderungen ideal erfüllt.

4. „Trilemma“ des Brennstoffzelle-Pkws

Eher zufällig entdeckte der deutsch-schweizerische Chemiker Christian Friedrich Schönbein im Jahre 1838 die Brennstoffzelle. Ein Jahr später führte der britische Naturwissenschaftler Sir William Grove erste Experimente damit durch. Danach geriet die Entdeckung in Vergessenheit. Erst in der Raumfahrt der fünfziger Jahre erlebte sie ein Comeback. Unter Brennstoffzelle wird heute die Wasserstoff-Brennstoffzelle verstanden. Das ist nicht ganz korrekt, denn es könnten statt Wasserstoff und (Luft-) Sauerstoff auch andere Elemente direkt in elektrische Energie umgesetzt werden (zum Beispiel Methan). Diese Brennstoffzellen spielen aber für elektrische Mobilität derzeit kaum eine Rolle. Erreicht werden Wirkungsgrade von 55 Prozent, 60 bis 64 Prozent sind schon im Visier der Entwickler, jedenfalls in geringen Lastbereichen, will heißen, bei kontinuierlicher Fahrt und mäßigen Geschwindigkeiten. Die restliche Energie fällt als Abwärme an, beim Pkw verwendbar für die Fahrzeugheizung. Das Brennstoffzellen-Auto wird nicht nur von Opel, sondern von allen großen Playern wie zum Beispiel Toyota, Honda, Nissan oder Daimler entwickelt. „Wir sind bereits auf der Zielgeraden zur Kommerzialisierung“ so Andreas Truckenbrodt von der Automotive Fuel Cell Corporation, einer mehrheitlich von Daimler getragenen Brennstoffzellen-Entwicklungsinitiative mit Ford und Ballard als weiteren Anteilseignern. Im Jahr 2015 soll die Markteinführung sein. Das klingt so, als wären wir bereits am Ziel, unsere gewohnte Mobilität mit Benzin- und Diesel-Pkw mittels Brennstoffzelle in die Zukunft zu retten. Wirklich?

Ikuo Kasahara, Manager von Toyota Motor Europe, zeigt welche Herkulesarbeit den Entwicklern der Brennstoffzelle noch bevorsteht. Die Kosten müssten um zwei Größenordnungen, will heißen auf ein Hundertstel der Ausgangslage von 2005 gedrückt werden. Die erste Kostensenkung auf ein Zehntel ist die schwierigste: Als Katalysator des elektrochemischen Prozesses wird Platin verwendet, ein knappes und teures Metall. Gefragt ist die gleiche Ka-

⁶ Theoretisch sind Zellspeicherdichten von 225 Wh/Kg für Li-Ionen-Akkus denkbar, was nach 2012 zu nutzbaren Batteriesystemspeicherdichten von maximal 100 Wh/Kg in der Serie führen kann.

talsatorwirkung mit einem Zehntel des Platinbedarfs von 2005, und das bei höherem Wirkungsgrad und längerer Lebensdauer. Fünfzehn Jahre, mindestens aber 240.000 Kilometer sollen die Brennstoffzellen ohne wesentlichen Leistungsverlust arbeiten.

Als „Trilemma“ bezeichnet Kasahara diese Aufgabe, weil sich nicht nur zwei Ziele widersprechen („Dilemma“), sondern drei (Tri): Unter sonst gleichen Bedingungen führt die Reduktion von Platin im Katalysator zu geringerer Leistung und kürzerer Lebensdauer. Möglicherweise kann nur ein anderer Katalysator als Platin das Geforderte möglich machen. Kenichiro Ota von der Yokohama National University experimentiert zum Beispiel mit Niobium- und Titandioxid.⁷ Niob und Titan sind im Vergleich zu Platin spottbillig. Der Anspruch auf einen Durchbruch bei den Kosten um den Faktor zehn erfordert eine Portion Verrücktheit. Merkwürdigerweise sind viele gestandene Entwickler so verrückt. Was macht sie so zuversichtlich? Es ist die Überzeugung, dass das Ziel erreichbar ist, weil das Potenzial vorhanden ist – ganz im Gegensatz zum Durchbruch bei der Akku-Entwicklung.⁸ Dort wird das Potenzial als gering eingeschätzt. Beim Faktor zwei wird es schon als ausgeschöpft angesehen. Die zweite Kostensenkung für die Brennstoffzelle auf ein weiteres Zehntel wird aus der Massenfertigung resultieren. Werden Kasaharas Ziele erreicht, wäre es der finale Garaus für die meisten Verbrennungsmotoren der Pioniere Nikolaus Otto und Rudolf Diesel. Nicht einmal das ausschließlich mit Akku gespeiste Stadtauto könnte mithalten. Aber sind die Ziele des Toyota Managers zu ambitioniert, um bis 2015 Realität zu werden? Toyota stapelt traditionsgemäß tief, um später die Konkurrenz mit unerwartetem Markteintritt zu verblüffen. Charles Freese, Manager von General Motors liefert Fakten, wie schnell die Fortschritte in der Brennstoffzellentechnik tatsächlich ver-

⁷ Showa Denko K.K. (SDK) hat unter dem NEDO Projekt (New Energy and Industrial Technology Development Organization), das von Professor Kenichiro Ota von der Yokohama National University geleitet wird, neue Platin-Ersatz-Katalysatoren für Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen (engl. polymer electrolyte fuel cell, PEFC) entwickelt. Diese neuen Katalysatoren bestehen aus einem auf Niobiumoxid basierendem Katalysator und einem auf Titandioxid basierendem Katalysator. Beide enthalten Kohlenstoff- und Stickstoffatome. Sie gehören damit zu den Platin-Ersatz-Katalysatoren mit der weltweit höchsten Effizienz in Bezug auf Leerlaufspannung und Lebensdauer.

⁸ Nach Analysen des Department of Energy der US-Regierung sind bei angenommenen 500.000 pro Jahr gefertigten Einheiten eines Brennstoffzellenfahrzeugs für 2009 US\$ 73 pro kW Antriebsleistung erreichbar und 2015 dann US\$ 30 pro kW Antriebsleistung und damit die Wettbewerbsfähigkeit mit dem Diesel (J. Garcke, Elektromobilität – Brennstoffzellen- und Batterietechnologie, 8. Brennstoffzellenforum Hessen, 09.11.2009). Sowohl Daimler als auch General Motors gehen davon aus, dass sich das Brennstoffzellenauto in 2020 in 100.000er Stückzahlen zu etwas 10 Prozent Mehrpreis eines sauberen Diesel herstellen lässt (das wären dann die etwa 50 US\$/kW). Auch die CONCAWE/EUCAR/JRC-Zahlen gehen in dieselbe Richtung. (<http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/V3.1%20TTW%20App%201%2007102008.pdf>, Seite 7). im Vergleich zum Diesel (21.600 €) und Benzin-Hybrid (25.900 €) liegt das Brennstoffzellenauto bei 31.200 € und das mit Hybrid-Brennstoffzellenauto bei 34.500 €, rund 50 % teurer - aber das ist 2010+ Technik in 100.000 Einheiten, die 2020 sicher noch etwas günstiger wären.

laufen.⁹ Die neuste Generation von Brennstoffzellenautos von General Motors benötigt im Vergleich zu 2005 (100 Testfahrzeuge) statt 80 nur noch 30 Gramm Katalysator-Platin, Volumen und Gewicht der Brennstoffzelleneinheit haben sich halbiert – und alles bei 20 % Leistungssteigerung. Das Serienprodukt nach 2015 soll dann nur noch 10 Gramm Platin enthalten.

5. Wer macht das Rennen?

Die Brennstoffzelle ist noch teuer, die Akkus sind noch schwer und teuer. Große Verbesserungen, eher Durchbrüche sind von Nöten, um den Markt aus Diesel und Benzinern schnell aufzurollen. Kühn sind die Prognosen. Um den CO₂-Ausstoß aus Mobilität im Zeithorizont von heute bis 2025 erheblich zu senken, sollten wir die Chinesen imitieren. Von den 1,3 Milliarden sind bereits 100 Millionen mit einem Elektrofahrrad unterwegs, unter anderem mit Raddaxis, die bei Staus im Vorteil sind, und mit Lastenfahrrädern. Mit dem E-Rad würden wir unseren Aktionsradius höchst bequem und preiswert erweitern. Der Energieverbrauch ist so gering, dass es nicht einmal lohnt, über die Herkunft des Stroms aus der Steckdose zu diskutieren. Bei den Olympia-Winterspielen in Vancouver hat das Unternehmen Horizon Fuel Technology aus Hongkong den Besuchern ein Elektrofahrrad mit Brennstoffzellen-Zusatzantrieb angeboten. Die Leistung beim Anfahren und die Reichweite des handelsüblichen chinesischen Akku-Elektrofahrrades wird durch einen zugeschalteten Brennstoffzellen-Antrieb vergrößert. Als Wasserstoffspeicher dient ein Metallhydrid, das Wasserstoff einzulagern vermag und ihn bei Erwärmung freigibt. Da konnten gut Betuchte schon mal einen Schnupperkursus für nachhaltige Mobilität belegen. Gefragt sind noch Modeschöpfer, die die Designer-Kluft für Elektro-Radfahrer entwerfen, die wind- und wetterfest sind, und den Träger als modischen Avantgardisten erkennen lassen. Weniger Betuchte konnten in Vancouver einen der 20 Brennstoffzellenbusse benutzen, die im Liniendienst ins Skigebiet führen.

So kühn die Prognosen zum Brennstoffzellenauto sein mögen, wahrscheinlich ist dennoch, dass der mit fossilen Brennstoffen angetriebene Pkw ein Produkt von gestern sein wird. Verbote könnte ein Verfall der Gewinnmargen sein, insbesondere bei hochwertigen Fahrzeugen. Automobilhersteller sind sich dessen bewusst. Die Furcht ist groß, im Wettbewerb um die Elektromobilität rückständig zu sein. Deutschland wäre tief betroffen, denn keine andere Industrienation hat eine so hohe Wertschöpfung pro Kopf im Automobilssektor. Und auch die vielen deutschen Patente der Automobil- und Zulieferindustrie könnten weniger wert sein. Bei den Automobilherstellern hat ein Run eingesetzt, sich Kompetenz für Elektromobilität zu verschaffen. Gefragt sind glückliche Ehen mit Firmen, die über ent-

⁹ Freese, Charles, Executive Director, Fuel Cell Activities General Motors: Hydrogen Fuel Cell Vehicles-Surviving the Advanced Tech "Valley of Death", Nov. 2009.

sprechende Kompetenz verfügen, zum Beispiel bei Elektromotoren und deren Steuerung, bei Akkus, Brennstoffzellen, Wasserstoffspeichern, Energieversorgung und einer Vielzahl von Komponenten. Das Rennen in der Automobilindustrie könnten diejenigen machen, die rechtzeitig Ehen mit den produktivsten Bräuten geschlossen haben. Die besten dürften schon versprochen sein.

6. Elektromobilität: Wettlauf der Nationen

Die Bundesregierung hat ein 500 Millionen Euro Forschungs- und Investitionsprogramm im Rahmen des Konjunkturpaketes II aufgelegt, Laufzeit bis Ende 2011.¹⁰ Bedeutungswahrender Name: *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung*¹¹, „um möglichst zügig den technologischen Anschluss der deutschen Industrie im Bereich Elektromobilität an die Weltspitze zu ermöglichen“. Das klingt so, als hinke die deutsche Automobilindustrie bereits hinterher. Seit Mitte 2008 läuft bereits ein *Nationales Investitionsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik (NIP)* in Höhe von 700 Millionen Euro, das weitere 700 Millionen Euro Co-Mittel der Industrie generieren soll, Laufzeit bis Ende 2016. Auch andere Nationen klotzen, die USA mit 2,4 Milliarden US\$ über zehn Jahre zuzüglich 25 Milliarden US\$ für Kredite an die Automobilhersteller und Zulieferer für Kraftstoff sparende Fahrzeuge. China will von 2009 bis 2011 zwei Milliarden Euro für Pilotprojekte mit 10.000 Fahrzeugen ausgeben. Noch 2009 erhielt China 68 Millionen Euro pro Jahr deutsche Entwicklungshilfe.....¹²

Nach Art und Umfang fließen in die Förderung von Elektromobilität durch die Bundesregierung mehr Mittel in Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie als in die Akku-basierte Forschung, ein Hinweis darauf, dass die Brennstoffzellenlinie strategisch bedeutsamer ist? Wenn ja, warum? Brennstoffzellen-Fahrzeuge decken ein sehr viel größeres Anforderungsspektrum des Verkehrs ab, nämlich auch große Teile des Güterverkehrs – ein in der Öffentlichkeit und damit auch in der Politik ewig unbeachtetes Segment. Politiker fahren Pkw, nicht Lkw.

7. Brennstoffzellen bei Bus + Bahnen

Daimler forscht und entwickelt für dreierlei Produktlinien: Der Pkw ist das Haupteinsatzfeld. Es werden 200 Brennstoffzellen-Pkw der 2. Generation produziert (Basis: Mercedes

¹⁰ Hinzukommen werden zirka 250 Millionen Euro so genannte Co-Mittel der industriellen Antragsteller.

¹¹ Er umfasst „Zell- und Batterieentwicklung, Komponenten und deren Standardisierung für Elektro-Fahrzeuge, Stromnetze, Netzintegration, Batterierecycling, Informations- und Kommunikationstechnologie, Ausbildung und Kompetenzaufbau.

¹² Das sei längst Wirtschaftsförderung, will heißen Sponsoring der Exportindustrie, so die matte Replik der Bundesregierung auf diese Komik. Dann aber wäre die Haushaltswahrheit verletzt, denn Wirtschaftsförderung an den Wettbewerber China wäre Sache des Wirtschafts-, nicht des Entwicklungshilfeministers.

B-Klasse), um die Kundenakzeptanz zu testen. Zugleich werden auch Transporter und Busse für den Nahverkehr mit mehreren baugleichen Brennstoffzellen-Elementen der Pkw-Version getestet. Fortschritte auf dem riesigen Massenmarkt der Pkw werden unmittelbar auf die Busse übertragen, freut sich Günter Elste, Chef der Hamburger Hochbahn, die bereits seit 2003 Wasserstoffbusse im Linienverkehr einsetzt. Ab 2011 kommen zehn Busse der neuesten Generation hinzu. Noch in 2010 begann außerdem ein Feldversuch mit sogenannten „seriellen Dieselhybridbussen“. Da treibt ein Dieselmotor, der immer im Bereich des höchsten Wirkungsgrades läuft, einen Generator an, der Fahrstrom erzeugt. Ein relativ kleiner Akku puffert diesen Vorgang. Er nimmt den im Generator gewonnenen Strom aus der Bremsenergie auf und gibt ihn beim Anfahren ab. In anderen Modellen werden zusätzlich, nämlich für eine sehr kurzfristige Pufferung weit unter einer Minute, Kondensatoren eingesetzt – sogenannte Supercaps. Sie erzeugen kaum Verluste bei Speicherung und Entnahme, sind billig und verschleifen nicht. Durch Pufferung mit dem Akku kann der Dieselmotor kleiner, sparsamer und preiswerter ausfallen. Erwartet wird eine Senkung des Energieverbrauchs um 25 Prozent, noch stärker sinken die Schadstoffe im Abgas. In späteren Fahrzeuggenerationen kann der Dieselmotor durch Brennstoffzellen ersetzt werden. Der übrige Antriebsstrang braucht dann kaum mehr verändert zu werden. Für Brennstoffzellenfahrzeuge hat die Pufferung mit dem Akku eine ebenso große Bedeutung beim Energiesparen, denn auch die Brennstoffzelle hat Leistungsbereiche mit schlechterem Wirkungsgrad. So wird bei sehr geringer Leistungsabforderung der Strom ausschließlich aus dem Akku entnommen, bei hoher Leistungsabforderung, also beim Beschleunigen, fließt der Strom sowohl aus der Brennstoffzelle als auch aus dem Akku.

Interessant könnte die Brennstoffzelle im Schienenverkehr werden. Auf den Hauptstrecken wird zwar mit Oberleitung gefahren aber mit Wasserstoff im Tank und Akku-Pufferung (Rückspeisung von Bremsenergie für den Anfahrvorgang) könnte man sich so manche Oberleitung auf Nebenstrecken sparen, jedenfalls für Züge mit geringer Last. Auch manche Oberleitungsstörung ließe sich leichter überbrücken. Das deutsche Schienennetz könnte besser ausgenutzt werden, weil überlastete (elektrifizierte) Knoten auf nicht elektrifizierten Nebenstrecken umfahren werden könnten.

8. Wasserstoff in den Tank

Die anfangs nur wenigen Wasserstofffahrzeuge benötigen ein Minimum an flächendeckendem Tankstellennetz. Zunächst werden die Ballungsräume, dann die Achsen zwischen ihnen mit Tankstellen ausgestattet, so „H2-Mobility“, eine Initiative der führenden Unternehmen von Fahrzeugherstellern, Tankstellenketten und Energieversorgern. Bis 2017 sollen auch die übrigen Räume erschlossen sein. Die Etablierung von Wasserstofftankstellen gleicht der von Erdgastankstellen. Die Grundausstattung von 1000 H2-Tankstellen ist vorzufinanzieren, bis die Zahl der Nutzer groß genug ist, um das Tankstellennetz kostende-

ckend zu betreiben. Investitionsbedarf: zirka zwei Milliarden €, knapp die Hälfte der Abwrackprämie, kein strategisches Hindernis für einen Durchbruch von Brennstoffzellenfahrzeugen.

9. Woher kommt der Wasserstoff?

Wasserstoff kann aus fossilen Energien hergestellt werden, zum Beispiel aus Erdgas, bis zu 98 % Methan – CH₄. In einem sogenannten Dampfreformer finden nacheinander folgende Reaktionen statt: Aus Methan (CH₄) und Wasserdampf (H₂O) wird Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (3 H₂). Anschließend wird aus Kohlenmonoxid (CO) und weiterem Wasserdampf (H₂O) Kohlendioxid (CO₂) und Wasserstoff (H₂). Dem Klima hilft diese Art der Wasserstoffherzeugung überhaupt nicht. Würde das Erdgas in einem umgerüsteten Benziner (Otto-Motor) verbrannt werden, ergäbe sich etwa die gleiche Energie- und CO₂-Bilanz. Es kann aber trotzdem sinnvoll sein, eine solche Wasserstoffproduktion eine Zeit lang zu „dulden“, um der Etablierung von Elektromobilität Schub zu verleihen. Ein pedantisches Vorgehen, zunächst die vollständige Wasserstoffkette aus regenerativen Energien darzustellen und erst dann Brennstoffzellenautos an den Markt zu bringen, würde die Konversion zur Elektromobilität behindern. Die gleichzeitigen Entwicklungen von Wasserstoffkette und Brennstoffzellenauto beflügeln sich gegenseitig.

Auch aus Biomasse lässt sich Wasserstoff erzeugen, denn Biogas besteht überwiegend aus Methan und kann – wie das Methan des Erdgases durch einen Dampfreformer geleitet werden. Aber es ist wirtschaftlicher und damit umweltfreundlicher, dezentral anfallende Biomasse wie Gülle oder Stroh dezentral zu verstromen und mit der dabei anfallenden Abwärme vor Ort zu heizen (Kraft-Wärme-Kopplung). Biomasse anzubauen, zum Beispiel schnell wachsende Hölzer, um in großen zentralen Anlagen Strom oder Treibstoffe zu erzeugen, ist wegen der Nutzungskonkurrenz zu Nahrungs- und Futtermitteln in Verruf geraten. Faszinierend, aber noch Zukunftsmusik ist die biotechnische Wasserstoffproduktion mit Grünalgen, die oxygene Photosynthese. Letztlich wird durch die Energie des Sonnenlichtes Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Die Algen stellen allerdings hohe Ansprüche an ihren Lebensraum. Deshalb versuchen zum Beispiel die Forscher der Max-Planck-Gesellschaft die Arbeitsweisen der kleinen Lebewesen zu imitieren, um auf ihre biologischen Ansprüche keine Rücksicht nehmen zu müssen.

„Grüner Wasserstoff“ wird heute hauptsächlich durch Elektrolyse, also die Aufspaltung von Wasser in Wasser- und Sauerstoff mit regenerativ erzeugtem Strom produziert. So geschieht es auch in der von Vattenfall betriebenen Wasserstofftankstelle für die Busse der Hamburger Hochbahn. Die energetischen Potenziale in Europa sind größer als die fossilen Energien, die heute von allen Verkehrsarten im Personen- und Güterverkehr zu Lande, zu Wasser und in der Luft verbraucht werden. Das größte deutsche Potenzial ist der Wind-

strom vor der Küste (off-shore), noch größer als das an Land (on-shore). Weltweit dominiert die Solarthermie (SOT) mit den größten Potenzialen in Afrika. Die Sonnenenergie der Sahara wird durch viele große Spiegel gebündelt und erzeugt Wasserdampf, der in Turbinen Strom erzeugt. Desertec ist das bisher größte Ökostrom-Projekt. Bis zum Jahr 2050 sollen Sonnenkraftwerke in der Sahara bis zu 15 Prozent des europäischen Strombedarfs decken und auch Nordafrika versorgen. Die Planungsgesellschaft Desertec Industrial Initiative (DII) wurde am 30. Oktober 2009 in München gegründet, mit dabei die Solarbranche, Siemens, E.ON, RWE und die Deutsche Bank, um nur die deutschen Gesellschafter zu nennen.

10. Windstrom bald konkurrenzfähig, weil Öl-, Kohle- und Erdgaspreise gleichzeitig explodieren

Windstrom wird bereits 2020 im Vergleich zu Steinkohlestrom konkurrenzfähig sein, so die Prognose der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik – ohne Einspeisevergütung versteht sich, weil die spezifischen Kosten der Windmühlen in Euro pro installierter Leistung durch Innovation und Massenfertigung permanent sinken.¹³ Gegenläufig dazu steigen die Kosten für Steinkohle. Bis zum Einbruch der Weltwirtschaft in Folge der Finanzkrise ist der Weltmarktpreis für Steinkohle ebenso stark wie der Ölpreis explodiert, so das Hamburgische Weltwirtschaftsinstitut (HWWI). Ursache: Die Investitionen in Bergwerke, Transport- und Umschlaganlagen haben mit der Ausweitung der Förderung nicht mitgehalten. Neue Infrastruktur ist zudem teuer, denn bislang sind die Filetlagerstätten ausgebeutet worden, Filet im Sinne Wirtschaftlichkeit von Förderung und Transport, so Werner Zittel von der Energy Watch Group. Deutschland könnte auf seine riesigen Braunkohlevorkommen zurückgreifen – nach Russland die zweitgrößten der Welt.¹⁴ Aber die Braunkohleverstromung produziert am meisten Kohlendioxid. Dieses in großem Umfang zurück in ausgebeutete Erdgasfelder zu drücken, hat bisher den Status einer langfristigen Option, deren Nachhaltigkeit („CO₂ für immer versenkt“) noch in Zweifel gezogen wird. Strom aus Erdgas wird sich kurz und langfristig ebenfalls verteuern, weil es auf vielfältige Weise Öl ersetzen kann. Ein nur wenig umgerüsteter Pkw kann statt mit Benzin mit Erdgas betrieben werden, die Hausheizung mit Erdgas statt Dieselöl. Auch Grundsubstanzen für die chemische Industrie werden oft alternativ aus Erdgas oder Öl erzeugt. Der Erdgaspreis wird daher dem Ölpreis weitgehend folgen.

¹³ Der Zeitpunkt, an dem die Kosten von Windstrom mit denen von Steinkohlestrom gleichziehen, wird schon vor 2020 eintreten, je höher sich der Preis an den Börsen für die Emission von CO₂ einpendelt, desto früher.

¹⁴ Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover. Deutschland verfügt über 14 % der Weltreserven.

11. Test: Windstrom ins Netz oder für Elektromobilität?

Ist es vernünftig, aus Nordsee-Windstrom Wasserstoff für Elektromobilität zu erzeugen? Oder wäre es besser, den Windstrom ins Netz zu speisen, damit fossile Kraftwerke einzusparen und dadurch weniger CO₂ in die Atmosphäre zu blasen? Da kann ein Test helfen. Die Versuchsanordnung:

1. Windstrom aus der Nordsee (Wechselstrom) wird in Gleichstrom umgewandelt und in einen Elektrolyseur geschickt. Der erzeugte Wasserstoff gelangt über Rohrleitungen und Zwischenspeicher zu den Tankstellen. Dort fließt er – auf 700 bar verdichtet – in die Druckspeicher der Pkw und wird dann über die Brennstoffzellen in Strom für die Fahrmotoren und schließlich in mechanische Energie am Rad umgewandelt.
2. Windstrom aus der Nordsee wird an der Küste in das öffentliche Stromnetz eingespeist und ersetzt auf diese Weise ein (Erd-) Gas-Dampf-Kraftwerk (Wirkungsgrad: 58 Prozent). Das dadurch eingesparte Erdgas wird als Treibstoff für Erdgasautos verwendet.

Welche Verwendung von Windstrom lässt weniger CO₂ entstehen? Über die Wasserstoffkette kommt gut 25 Prozent als mechanische Energie am Pkw-Rad an, bei Einspeisung des Windstroms ins Netz könnte man mit dem eingesparten Erdgas für das Gas-Dampf-Kraftwerk über 30 Prozent an mechanischer Energie erzeugen. Das hieße, jede erzeugte Kilowattstunde Windstrom gehört zunächst einmal ins Netz! Stimmt aber nicht! Wind richtet sich nicht danach, wann Strombedarf im Netz herrscht. Er bläst nachts etwa genauso stark wie am Tag. Wir haben schon nachts zu viel Strom, weil wir Grundlastkraftwerke, zum Beispiel Braunkohle- und Atomkraftwerke, nur geringfügig herunterfahren können. Im Winterhalbjahr bläst der Wind doppelt so stark wie im Sommerhalbjahr, aber der Strombedarf im Winter ist nicht doppelt so hoch wie im Sommer. Bei manchen Wetterlagen in Deutschland und sogar in ganz Europa fällt Windstrom mehrere Tage, manchmal Wochen lang, entweder üppig oder nur dürrtig an. Strom kann aber nur in vernachlässigbarem Ausmaß gespeichert werden, sodass ein großer Anteil von Windstrom überhaupt nicht oder nur sehr ineffizient genutzt werden kann. Damit verkehrt sich das Ergebnis des Tests ins Gegenteil: Weil der Wind "wetterwendisch" bläst und sich nicht darum schert, wann Strom im Netz benötigt wird, ist Windstrom für die Erzeugung von Wasserstoff erste Wahl, weil sich Wasserstoff speichern lässt – ähnlich unproblematisch wie Erdgas, relativ preiswert und in großem Umfang. "Der Konflikt in Georgien zeigt, dass wir uns auch beim [Erd-] Gas nicht noch stärker einseitig abhängig machen dürfen", erklärte im Sommer 2008 der damalige Wirtschaftsminister Michael Glos der "Frankfurter Allgemeine Zeitung". Auf 90 Tage des jährlichen Verbrauchs wollte der Minister die strategische Erdgasreserve ausweiten und damit verdoppeln, ebenso lang wie die gesetzliche Ölreserve. Etwa 40 Euro hätte dies einen Privathaushalt bei einem Jahresverbrauch von 20.000 Kilowattstunden

gekostet, lamentierte der deutsche Außenhandelsverband für Mineralöl und Energie. 20.000 Kilowattstunden Erdgas haben etwa den gleichen Energieinhalt wie knapp 2.300 Liter Benzin¹⁵, mit denen man bei einem Verbrauch von 7 Litern pro 100 Kilometer rund 33.000 Kilometer im Jahr fahren könnte. Die mittlere Fahrleistung in Deutschland beträgt etwa ein Drittel. Eine strategische Wasserstoffreserve für Elektromobilität würde also nur wenig kosten, sogar dann, wenn sich die Wasserstoffspeicherung teurer als die von Erdgas erweisen sollte.

12. Es geht nicht so weiter, weil es nicht so weitergehen kann

Im Flyer ihres Buches „Postfossile Mobilität“ konstatieren die Autoren Jörg Schindler und Martin Held, „das Ölangebot wird in naher Zukunft kontinuierlich abnehmen.“¹⁶ Die Krise der Automobilindustrie ist in diesem Kontext zu sehen. Einfacher: Die Automobilindustrie hat angesichts der Knappheit von Öl „nichts Passendes im Angebot“. Die Mobilitätsstrategie mit Wasserstoff ist eine glaubhafte Antwort und sie passt mit der Energiestrategie zusammen, fossilen und nuklearen Strom durch grünen, aber wetterwendischen Strom zu ersetzen. Aber da ist das Problem, die neue Strategie umzusetzen. Was tun, bis sie greift? Da helfen wohl nur Zumutungen wie Umsteigen aufs Elektrofahrrad und auf Pkw erheblich geringerer Masse („Downsizing“). „Es geht nicht so weiter, weil es nicht so weitergehen kann“, schreiben Schindler und Held. Das ist kein Kassandrarauf, sondern – schlimmer – eine Feststellung.

Abstract

Electric vehicles propelled with electricity generated by hydrogen in fuel cells are usually regarded as representing just a long-term goal. However, hardly noticed by the public, nearly all important car manufacturers are developing passenger cars, light duty vehicles and buses with hydrogen and fuel cells drive systems. In most cases these developments have already proceeded to 3rd generation prototypes. Several companies are planning the market introduction of such vehicles in 2015. There are big challenges but also big opportunities which justify these costly and comprehensive R&D efforts. In spite of hydrogen as a fuel for transport needing a new fuel infrastructure, there are also systemic advantages with regard to the use of renewably generated electricity: hydrogen (like methane) is perfectly suited as an energy storage in underground caverns for electricity derived from wind power. E-mobility based on hydrogen and fuel cells is matching perfectly with German strategic goals for the future supply of renewable electricity.

¹⁵ Unterer Heizwert von russischem Erdgas rund 11,2 KWh/m³, das entspricht einem Energieinhalt von knapp 1,23 Litern Benzin.

¹⁶ Jörg Schindler und Martin Held: Postfossile Mobilität, VAS –Verlag für Akademische Schriften, Bad Homburg 2009.

