

Michael Bräuninger, Philip Schnaars, Mark-Oliver Teuber

Die Auswirkungen der Elektromobilität auf den Strommarkt und die CO₂-Bilanz

In der aktuellen energiepolitischen Debatte werden dem Ausbau der Elektromobilität hohe Prioritäten eingeräumt, da mit der Umstellung von konventionellen Fahrzeugen auf elektrische Antriebe große CO₂-Einsparpotenziale verbunden werden. So strebt die Bundesregierung bis 2030 6 Mio. zugelassene Elektroautos an.¹ Um dieses Ziel zu erreichen, wurde unter anderem eine Anschaffungsprämie von 4000 Euro pro Fahrzeug als staatliche Förderung von Elektroautos eingeführt. Im Folgenden wird untersucht, ob die mit dem Ausbau der Elektromobilität verbundenen Ziele tatsächlich erreicht werden können.

Entwicklung der Stromerzeugung

In den letzten Jahren sind die Stromerzeugungskapazitäten von Wind und Sonne stark ausgebaut worden, sodass die erneuerbaren Energien 50% der Erzeugungskapazitäten von 202 GW im Jahr 2014 stellten. Dabei entfielen auf Wind und Photovoltaik jeweils etwa 19% der gesamten Erzeugungskapazität. Die Anteile von Kohle lagen bei 29% und von Gas bei 13%. Der Anteil von Kernenergie, die in den nächsten Jahren stillgelegt wird, betrug etwas über 6%. Da die Erzeugungskapazitäten von Wind und Photovoltaik witterungsbedingt nicht durchgehend genutzt werden können, lag der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung 2015 bei 26% und damit nur etwa halb so hoch wie der Anteil an der Erzeugungskapazität. Anhand der Differenzen zwischen den Anteilen an der Erzeugung und den Kapazitäten zeigt sich die unterschiedli-

che Wettbewerbsfähigkeit der Energieträger: Sofern Wind weht und die Sonne scheint, wird soweit möglich die Erzeugungskapazität der erneuerbaren Energien genutzt. Dafür sorgt nicht nur der Einspeisevorrang, sondern auch der Fakt, dass Wind und Sonne kostenlos zu Verfügung stehen und damit Grenzkosten von null vorliegen. Neben den erneuerbaren Energien gibt es Kraftwerke, die immer betrieben werden müssen. Sofern diese Must-run-Kapazitäten und die erneuerbaren Energien ausreichen, um die Stromnachfrage zu decken, werden keine weiteren konventionellen Kraftwerke zugeschaltet. Ist die Stromnachfrage größer als die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Must-run-Kapazitäten, ergibt sich eine positive Residuallast, die durch konventionelle Kraftwerke gedeckt werden muss. Sofern die Erzeugung aus erneuerbaren Energien und aus Must-run-Kapazitäten den inländischen Strombedarf übersteigt, liegt eine negative Residuallast vor.

Bei positiven Residuallasten werden gemäß dem Merit-Order-Prinzip zunächst die Kraftwerke mit den geringsten Grenzkosten der Stromerzeugung zugeschaltet. Dabei entsprechen die Grenzkosten den Zusatzkosten für die Erstellung des Stroms, wobei die Kraftwerkskapazität gegeben ist. Im Wesentlichen werden die Grenzkosten der Stromerzeugung durch die Kosten der Energieträger bestimmt. Konkret werden die folgenden Grenzkosten der Stromerzeugung unterstellt: Braunkohle 15 Euro/MWh, Steinkohle 31,50 Euro/MWh sowie Gas 38,30 Euro/MWh.²

Wollte man die Konsequenzen der Elektro-Pkw beurteilen, ist es entscheidend, in welcher Form der notwendige Fahrstrom erzeugt wird. Die geringsten Grenzkosten haben Kernkraftwerke, dann folgen Braunkohle-, dann Steinkohlekraftwerke. Die höchsten Grenzkosten haben die Gaskraftwerke. Dabei werden die Grenzkosten zum einen durch die Rohstoffpreise, zum anderen durch die Preise für CO₂-Emissionszertifikate bestimmt. In den derzeitigen Grenzkosten sind CO₂-Zertifikatspreise von 7,50 Euro/t CO₂ enthalten. Diese werden entsprechend der Energiereferenzprognose des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie auf 40 Euro/t steigen.³ Gleichzeitig wird der Preis für Gas um 35% steigen, während die Prei-

¹ Vgl. Bundesregierung: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin 2010.

² Vgl. P. Graichen et al.: Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2015, Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen, Berlin 2016.

³ Vgl. M. Schlesinger et al.: Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, Projekt Nr. 57/12, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Basel u.a.O. 2014.

Prof. Dr. Michael Bräuninger lehrt an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg und leitet Economic Trends Research (ETR) in Hamburg.

Philip Schnaars, B.Sc., ist Mitarbeiter bei ETR.

Dr. Mark-Oliver Teuber ist Mitarbeiter bei ETR und Lehrbeauftragter an der Hochschule für Ökonomie und Management (FOM).

se für Kohle weitgehend unverändert bleiben. In der Folge steigen die Grenzkosten der Stromerzeugung mit Braunkohle auf 46 Euro, mit Steinkohle auf 55 Euro und mit Gas auf 64 Euro je MWh.

Um die Residuallast bis 2030 zu prognostizieren, werden die Erzeugungskapazitäten auf Grundlage der Ausbaupfade des Erneuerbare-Energien-Gesetzes fortgeschrieben. Dabei werden folgende jährliche Kapazitätserweiterungen zugrunde gelegt: Wind onshore 2,5 GW jährlich, Wind offshore 0,8 GW jährlich sowie Photovoltaik 2,5 GW jährlich. Die Kapazitätsauslastungen werden auch 2030 durch die Wetterlage bestimmt. Deshalb wird zur Prognose der Stromerzeugung durch erneuerbare Energien im Jahr 2030 die Kapazitätsauslastung aus dem Jahr 2015 auf die höheren Kapazitäten im Jahr 2030 angewendet. Für die Prognose der Residuallast wird außerdem eine konstante Must-run-Kapazität von 20 GW und ein im Zeitverlauf konstanter Stromverbrauch angenommen.

Der Einfluss von Elektro-Pkw auf den Strommarkt

Bei Fortschreibung der Stromverbräuche von Elektro-Pkw auf Basis der Markthochlaufszzenarien verbrauchen die 6 Mio. Elektro-Pkw 2030 zusätzlichen Strom von 16,8 TWh. In welcher Form der zusätzliche Stromverbrauch bereitgestellt wird, hängt von dem Zeitpunkt für das Laden der Elektroautos ab. Studien zeigen, dass Elektro-Pkw – bei ungesteuertem Laden – am häufigsten zwischen 18 und 20 Uhr, also in der Zeit mit der höchsten Stromnachfrage des Tages, geladen werden.⁴ Darüber hinaus gibt es Evidenz dafür, dass die Besitzer von Elektroautos diese üblicherweise bereits dann laden, wenn die Batterie noch mehr als halb voll ist, um nicht Gefahr zu laufen, dass sich diese während der Fahrt vollständig entleert.⁵ Werden allerdings Anreize geschaffen, zu Zeiten geringerer Lasten zu laden, zeigt sich eine deutliche Verschiebung des Ladezeitraums.⁶ Dies kann infolge variabler Strompreise erfolgen. Bei geringer Nachfrage (z.B. nachts) wären die Preise niedriger als in Zeiten mit hoher Nachfrage. Hierdurch würde sich das Laden in die Nacht verlagern, wodurch künftig potenziell zunehmende Überschüsse aus regenerativ erzeugtem Strom verwendet werden könnten. Dies würde sich positiv auf die CO₂-Bilanz der Elektro-Fahrzeuge auswirken und könnte darüber hinaus einen Beitrag zur Netzstabilität leisten.

4 Vgl. enercity Contracting: Demand Response – Das Auto als aktiver Speicher und virtuelles Kraftwerk, Abschlussbericht, Hannover 2016.

5 Vgl. G. Fetene et al.: Harnessing Big-Data for Estimating the Energy Consumption and Driving Range of Electric Vehicles, Paper presented at Transportation Research Board (TRB) 95th Annual Meeting, Washington DC 2016.

6 Vgl. enercity Contracting, a.a.O.

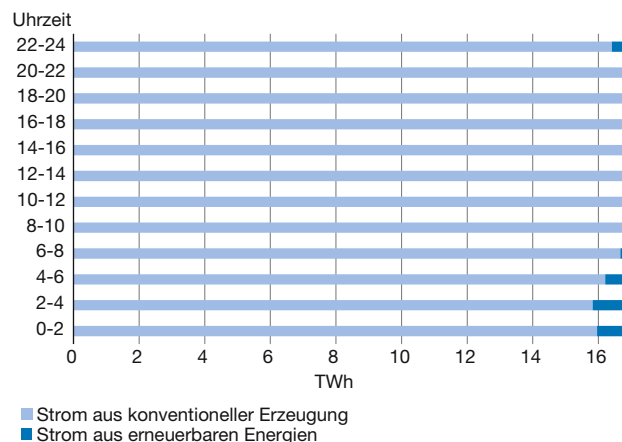
Im Folgenden wird angenommen, dass an jedem Tag die gleiche Menge geladen wird, sodass der Tagesbedarf 1/365 des jährlichen Fahrstrombedarfs entspricht. Für diese Annahme spricht, dass die Elektro-Pkw überwiegend für Kurzstrecken eingesetzt werden, die Besitzer der Pkw aber bestrebt sein werden, die Batterie immer vollständig geladen zu halten, um die größtmögliche Flexibilität bei den Fahrstrecken zu haben. Einige Besitzer von Elektro-Pkw werden an einzelnen Abenden nicht laden. Dafür werden andere, die am Vortag nicht geladen haben oder größere Strecken gefahren sind, eine höhere Ladeleistung beanspruchen. Im Durchschnitt gleichen sich diese Effekte aus. Um die Bedeutung des Ladezeitpunktes zu illustrieren, wird angenommen, dass alle Elektro-Pkw innerhalb eines Zwei-Stunden-Zeitblocks aufgeladen werden. Die durchschnittliche Batteriekapazität der Elektroautos beträgt 24 kWh. Es wird unterstellt, dass mögliche Ladeleistungen von 4 kW im Haushaltsbereich und bis zu 11 kW unter Verwendung von Wallboxen erreicht werden können. Autos mit geringerer Fahrleistung werden eher über den normalen Haushaltsstrom geladen, während die Elektro-Pkw mit höherer Fahrleistung wahrscheinlich auch mit höheren Leistungen geladen werden. Wenn bei den Pkw mit geringeren Fahrleistungen jeden Tag ungefähr 30% der Batterie geladen werden, dann ergibt sich mit einer 4 kW-Ladeleistung eine Ladedauer von zwei Stunden. Die Autos, die mehr gefahren werden, gleichen ihren höheren Fahrstrombedarf durch schnellere Ladegeschwindigkeiten aus, sodass im Durchschnitt daraus wieder eine Ladedauer von etwa zwei Stunden resultiert.

Sofern alle Elektro-Pkw in der Mittagszeit geladen werden, muss fast der gesamte Strombedarf von 16,8 TWh durch konventionell erzeugten Strom gedeckt werden. Der geringste Bedarf an nicht-regenerativ erzeugtem Strom besteht mit 15,83 TWh zwischen zwei und vier Uhr. Selbst wenn alle Elektroautos jeden Tag zu dieser Zeit geladen werden sollten, kann der Ladestrombedarf von 16,8 TWh nur zu ca. 6% aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden. Abbildung 1 illustriert den zusätzlichen Verbrauch an konventionell erzeugtem Strom pro Zeitblock.

Da die Residuallasten in der Nacht am geringsten sind und hier am häufigsten Überschüsse von regenerativen Energien vorliegen, werden die Energieversorger künftig Anreize bieten, in der Nacht zu laden. Dies kommt den Besitzern der Elektro-Pkw entgegen, da das Laden in der Nacht in der eigenen Garage (oder am Stellplatz) komfortabler ist als andere Lademöglichkeiten.⁷ Aufgrund der Vorteile beim

7 Vgl. R. Follmer et al.: Mobilität in Deutschland, Abschlussbericht 2008, Struktur-Aufkommen-Emissionen-Trends, Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.), Bonn, Berlin 2008.

Abbildung 1
Zusätzlicher Strombedarf für das Laden
von Elektro-Pkw



Quelle: Economic Trends Research.

Laden ist davon auszugehen, dass zunächst Haushalte mit eigenem Pkw-Stellplatz den höchsten Wechselanreiz in die Elektromobilität haben. 2013 waren dies 62,8% der deutschen Haushalte.⁸ Es wird angenommen, dass die Stromversorger mit den Besitzern der Elektro-Pkw Verträge schließen, die den Energieversorgern eine gewisse Flexibilität beim Laden einräumen. Da die Elektro-Pkw am Tag benötigt werden, kann der Ladeprozess zwischen 22 und sechs Uhr vorgenommen werden, wobei die Energieversorger die konkreten Zeitpunkte optimieren können, um die auftretenden Überschüsse an erneuerbaren Energien optimal zu nutzen. Selbst in diesem Idealfall müssen über 90% des Fahrstroms konventionell erzeugt werden. Wird ein Teil der Elektroautoflotte tagsüber geladen, ginge der erneuerbare Anteil am Fahrstrom noch weiter zurück.

Folgen für die CO₂-Emissionen

Die CO₂-Emissionen der Elektro-Pkw werden von der CO₂-Intensität des Fahrstroms geprägt, die wiederum von den CO₂-Emissionen bei der Stromerstellung abhängt. Diese werden hauptsächlich vom genutzten Primärenergieträger bestimmt. Unterstellt man flexibles Laden in der Nacht, können 9,8% des Fahrstrombedarfs über erneuerbare Energien gedeckt werden. Der restliche Strombedarf muss durch konventionelle Kraftwerke geliefert werden, wobei sich der CO₂-Ausstoß je nach Kraftwerksart stark unterscheidet. Nach der Prognose über den Stromverbrauch und den Ausbau erneuerbarer Energien liegt die maximale Residuallast in der Nacht 2030 bei 47,5 GW. Die gesamten Erzeugungskapazitäten aus Braun- und

Steinkohle übersteigen diesen Wert mit 57,7 GW deutlich. Demzufolge werden in keiner Nacht des Jahres 2030 Gaskraftwerke zugeschaltet. In 1256 der 2920 Nachtstunden werden ausschließlich Braunkohlekraftwerke benötigt und in 672 Stunden werden zusätzlich Steinkohlekraftwerke zugeschaltet. Aus dieser Verteilung ergibt sich für den Fahrstrom ein CO₂-Äquivalent von 970 g/kWh.

Die CO₂-Emissionen/km sind abhängig vom notwendigen Energieeinsatz/km und dem CO₂-Gehalt des Energieträgers. Die CO₂-Emissionen je gefahrenen Kilometer sind zum einen vom Treibstoff abhängig, zum anderen auch von den CO₂-Emissionen bei der Herstellung des Pkw. Konventionell und elektrisch angetriebene Pkw unterscheiden sich bei den CO₂-Emissionen im Wesentlichen durch die Batterie. Deshalb werden die CO₂-Emissionen für die Batterie auf die Fahrleistung umgelegt und zu den Treibstoffverbräuchen hinzugerechnet. Die CO₂-Emissionen/km für die Batterie ergeben sich aus den CO₂-Emissionen für die Erstellung der Batterie (140 kg/kWh) und der Fahrleistung, wobei eine durchschnittliche Lebensdauer des Fahrzeugs von 13 Jahren unterstellt wird. Die Berechnung der CO₂-Faktoren wurde vom Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) vorgenommen.⁹ Unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionen für die Erstellung der Batterie liegt der CO₂-Ausstoß der Elektro-Pkw deutlich über dem Ausstoß konventioneller Pkw. Der CO₂-Ausstoß der Elektrofahrzeuge würde gegenüber dem Ausstoß derselben Zahl von konventionellen Pkw um 13,6% zunehmen.

Die deutliche Verschlechterung der CO₂-Bilanz durch die Elektro-Pkw ist im Wesentlichen die Folge des hohen Einsatzes von mit Braun- oder Steinkohle erzeugtem Strom. Hierzu kommt es zum einen, weil nachts geladen wird, wenn die Netzlast insgesamt gering ist. Zum anderen, weil sich die Reihenfolge der Grenzkraftwerke auch bei einem deutlichen Anstieg der CO₂-Preise auf 40 Euro/t nicht verändern würde. Sofern ein größerer Anteil von Pkw am Tag geladen werden würde oder aber der CO₂-Preis sehr viel stärker steigen würde als angenommen, kämen statt der Steinkohlekraftwerke Gaskraftwerke zum Einsatz, bei deren Stromerzeugung deutlich weniger CO₂ emittiert wird. Nimmt man an, dass der gesamte Fahrstrom durch erneuerbare Energien, Gaskraftwerke und Braunkohle erzeugt wird, wobei die Gaskraftwerke die Steinkohle ersetzen, würden die Elektro-Pkw etwa denselben CO₂-Ausstoß generieren, wie die konventionellen Pkw, die sie ersetzen. Folglich wird auch in diesem Fall das Ziel einer Verbesserung der CO₂-Bilanz nicht erreicht.

8 Vgl. Statistisches Bundesamt: Einkommens- und Verbrauchsstichprobe, Wohnverhältnisse privater Haushalte, Fachserie 15, Sonderheft 1, Wiesbaden 2013.

9 Vgl. H. Helms et. al.: Umweltbilanzen Elektromobilität. Grundlagenbericht, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg 2011; H. Helms et al.: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen, Umweltbundesamt, 2016.