

Elektromobilität in Deutschland: CO₂-Bilanz hängt vom Ladestrom ab

Von Wolf-Peter Schill, Clemens Gerbaulet und Peter Kasten

Die Bundesregierung plant eine deutlich stärkere Nutzung elektrischer Antriebe im Straßenverkehr. Welche Auswirkungen hätte dies auf das Stromsystem und den CO₂-Ausstoß in Deutschland? Dieser Frage wurde in einem europäischen Forschungsprojekt im Rahmen unterschiedlicher Szenarien bis zum Jahr 2030 nachgegangen. Eines der zentralen Ergebnisse: Der gesamte Jahresstromverbrauch der je nach Szenario vier bis fünf Millionen elektrischen Pkw wäre gering. Jedoch würde die Aufladung der Fahrzeuge insbesondere bei ungesteuerter Aufladung, bei der die Pkw nach der Verbindung mit dem Stromnetz so schnell wie möglich vollständig aufgeladen werden, zu problematischen Spitzenlasten im Stromsystem führen. Die Art der zusätzlich notwendigen Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge hängt ebenfalls stark vom Lademodus ab. So wäre bei einer systemkostenoptimierten Aufladung der Anteil von Stein- und Braunkohlestrom besonders hoch, was sich in überdurchschnittlich hohen spezifischen CO₂-Emissionen des Ladestroms widerspiegelt. Bei gemeinsamer Betrachtung des Strom- und Verkehrssektors ginge die Einführung der Elektromobilität dann mit einer deutlichen Netto-CO₂-Reduktion einher, wenn sie mit einem zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien verknüpft würde, der über die bisherigen Ausbauplanungen hinausgeht.

Die verstärkte Nutzung elektrischer Antriebe im Bereich des motorisierten Individualverkehrs¹ ist ein erklärtes Ziel der Bundesregierung. Bis zum Jahr 2020 soll ein Bestand von einer Million elektrischen Fahrzeugen in Deutschland erreicht werden, im Jahr 2030 sollen es sechs Millionen sein.² Gleichzeitig soll Deutschland bis zum Jahr 2020 „Leitmarkt“ sowie „Leitanbieter“ im Bereich der Elektromobilität werden.³ Um diese Ziele zu erreichen, hat die Bundesregierung unter anderem die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) ins Leben gerufen. Nach einer Phase der „Marktvorbereitung“ (bis 2014) und des „Markthochlaufs“ (bis 2017) soll bis zum Jahr 2020 der Massenmarkt erreicht werden.⁴ Im September 2014 beschloss das Bundeskabinett ein Elektromobilitätsgesetz, das die Markteinführung elektrischer Fahrzeuge unterstützen soll.⁵

Die Einführung der Elektromobilität bringt viele Herausforderungen mit sich: So sind nach wie vor deutliche Verbesserungen bei Reichweite, Gewicht und Lebensdauer der Fahrzeugbatterien notwendig. Zudem ist die Anschaffung eines elektrischen Pkw aus Kunden-

1 Außerhalb des motorisierten Individualverkehrs gibt es weitere und teilweise schon lange etablierte Formen der Elektromobilität, insbesondere den schienengebundenen Nah- und Fernverkehr. Knapp 60 Prozent der Verkehrsleistung des öffentlichen Personenverkehrs in Deutschland werden mit elektrischen Antrieben erbracht. Im Jahr 2012 wurden mit dem öffentlichen Verkehrsangebot in Deutschland 167 Milliarden Personen-Kilometer (Pkm) erbracht (ohne Luftverkehr), darunter von den Bahnen insgesamt 105 Milliarden Pkm und hiervon elektrisch 95 Milliarden Pkm. Vgl. IFEU (2014): Auswertungen des Modells TREMOD 5.53 vom 15.11.2014.

2 Das 2020-Ziel wurde im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung vom August 2009 genannt und im Anschluss mehrfach bestätigt, so auch im aktuellen Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD vom Dezember 2013.

3 Bundesregierung (2011): Regierungsprogramm Elektromobilität.

4 Vgl. hierzu aktuell NPE (2014): Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung. Nationale Plattform Elektromobilität. Berlin, Dezember 2014.

5 Das Gesetz soll die Rechtsgrundlage schaffen, Elektrofahrzeugen bestimmte Privilegien einzuräumen, beispielsweise besondere Parkplätze an Ladestationen im öffentlichen Raum oder die Nutzung von Busspuren. Gesetzesentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Gesetzes zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge (Elektromobilitätsgesetz). Berlin, 24.9.2014, Bundestags-Drucksache 18/3418.

sicht noch immer vergleichsweise teuer, während die Modellauswahl beschränkt und die Akzeptanz der Fahrzeugnutzer weitgehend ungewiss ist. Darüber hinaus ist ein weiterer Ausbau der Ladeinfrastruktur erforderlich.

Gleichzeitig hat die Elektromobilität das Potential, mittel- bis langfristig vielfältige Chancen zu eröffnen. So bieten elektrische Fahrzeuge eine Option, Strom aus heimischen erneuerbaren Energien zu nutzen, ohne auf Biokraftstoffe zurückgreifen zu müssen. Außerdem sind elektrische Antriebe in der Regel deutlich effizienter als Verbrennungsmotoren. Zudem verursachen sie vor Ort nur einen geringen Ausstoß von Luftschadstoffen und keine CO₂-Emissionen. Allerdings ist es möglich, dass entsprechende Emissionen zumindest teilweise verlagert werden und stattdessen bei der Stromerzeugung entstehen. Nicht zuletzt besteht die Hoffnung, dass eine optimierte Netzintegration von Elektrofahrzeugen einen positiven Beitrag zur Flexibilisierung des Stromsystems leisten kann.⁶

Europäisches Forschungsprojekt untersucht Auswirkungen der Elektromobilität

Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts wurden mögliche Auswirkungen künftiger Elektrofahrzeugflotten auf das deutsche Stromsystem und die CO₂-Emissionen des Verkehrsbereichs untersucht.⁷ Im Mittelpunkt des Interesses standen dabei die Effekte auf den deutschen Kraftwerkseinsatz und die resultierende Netto-CO₂-Bilanz, jeweils unter verschiedenen Annahmen zur Ladestrategie der Elektrofahrzeuge.

Das Öko-Institut hat zunächst zwei Marktszenarien der Verbreitung von Elektroautos bis zum Jahr 2030 entworfen und die dazugehörigen Zeitprofile der stündlichen Fahrzeugnutzung und der Auflademöglichkeiten abgeleitet. Das DIW Berlin hat die Auswirkungen dieser Fahrzeugflotten auf das deutsche Stromsystem anschließend anhand eines Kraftwerkseinsatzmodells berechnet. Dessen Ergebnisse stellten wiederum wesentliche Eingangsparameter für ein Verkehrsmodell des Öko-Instituts dar, mit dem dieses die Nettobilanz der CO₂-Emissionen im Strom- und Verkehrssektor berechnete.

⁶ Für eine Übersicht vgl. Schill (2010): Elektromobilität in Deutschland – Chancen, Barrieren und Auswirkungen auf das Elektrizitätssystem. Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung, 79 (2), 139-159. <http://dx.doi.org/10.3790/vjh.79.2.139>

⁷ Dieser Wochenbericht basiert auf den Ergebnissen des europäischen Forschungsprojekts „Definition of an Evaluation Framework for the Introduction of Electromobility“ (DEFINE, ERA-NET Plus, Siebtes Rahmenprogramm). Das Projekt wurde vom Institut für Höhere Studien (Österreich) geleitet, weitere Partner neben dem DIW Berlin waren das Öko-Institut, das Umweltbundesamt (Österreich), die TU Wien (Österreich) sowie das Center for Social and Economic Research (Polen). <http://www.ihs.ac.at/projects/define/index.html>.

Szenarien zur Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland

Für den Zeitraum bis 2030 wurden am Öko-Institut zwei Elektromobilitätsszenarien für Deutschland entwickelt, die sowohl rein batterieelektrische Fahrzeuge als auch Plug-in-Hybride und Elektrofahrzeuge mit Reichweitenvergrößerer (Range Extender) umfassen (Kasten 1).⁸ In einem Business-as-usual-Szenario (BAU) werden die heute feststehenden politischen Rahmenbedingungen fortgeschrieben. Im Gegensatz dazu stellt das Szenario „Electromobility“ (EM⁺) weitere Politikmaßnahmen, die der Förderung der Elektromobilität dienen. Dazu gehören eine höhere Besteuerung fossiler Kraftstoffe, ambitioniertere Emissionsstandards für Neufahrzeuge und die Einführung eines auf Emissionen beruhenden Bonus-Malus-Systems bei der Neuzulassung von Pkw.⁹ Für die Ableitung der Fahrzeugnutzung wurden repräsentative Mobilitätsdaten für Deutschland verwendet.¹⁰ Die Kaufentscheidung zwischen Pkw mit verschiedenen Antriebstechnologien wurde auf Basis einer Conjoint-Analyse von 1500 befragten Neuwagenkäufern simuliert.¹¹

Zu den wesentlichen Einflussfaktoren für den Kauf und die Nutzung elektrischer Pkw gehören die Anschaffungskosten, Nutzungskosten, Ladeinfrastrukturanforderungen, Ladezeiten sowie die Häufigkeit langer Fahrten, die über die Reichweite rein elektrischer Pkw hinausgehen. Ungefähr 50 Prozent der Pkw-Besitzer in Kernstädten besitzen keine Parkmöglichkeit auf dem eigenen Grundstück und wären damit bei der Nutzung eines elektrischen Pkw vollständig von anderweitiger Ladeinfrastruktur abhängig. Der Anteil der Pkw-Besitzer ohne Stellplatz auf dem eigenen Grundstück sinkt in Vororten und im ländlichen Raum auf 30 Prozent. Im Schnitt fallen je Fahrzeug und Jahr um die sechs Fahrten mit einer Länge von jeweils mehr als 150 Kilometer an. Anhand der sogenannten Poisson-Wahrscheinlichkeitsverteilung kann davon ausgegangen werden, dass die Wahrscheinlichkeit, mit

⁸ Für weitere Details zur Definition der Szenarien vgl. Kasten, P., Hacker, F. (2014): Two electromobility scenarios for Germany: Market development and their impact on CO₂ emissions of passenger cars in DEFINE. Berlin, 14. November 2014.

⁹ Fahrzeuge, die hohe spezifische Emissionen aufweisen, werden beim Fahrzeugkauf mit einer finanziellen Abgabe versehen; Fahrzeuge mit niedrigen spezifischen Emissionen erhalten beim Fahrzeugkauf dagegen eine finanzielle Unterstützung.

¹⁰ Follmer, R. et al. (2010): Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht: Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. Bonn und Berlin, Februar 2010.

¹¹ Die befragten Personen mussten sich dabei mehrfach zwischen verschiedenen Fahrzeugtypen entscheiden, die sich unter anderem im Hinblick auf die Antriebsart, die Leistung, die CO₂-Emissionen sowie Anschaffungs- und Kraftstoffkosten unterschieden. Vgl. Götz, K. et al. (2011): Attraktivität und Akzeptanz von Elektroautos. Arbeitspaket 1 des Projekts OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotentiale von Elektrofahrzeugen. Frankfurt am Main, Oktober 2011.

Kasten 1

Verwendete Begriffe

Zur Elektromobilität werden hier folgende Pkw-Typen gezählt:

- Rein batterieelektrische Fahrzeuge: Sie verfügen ausschließlich über eine elektrische Traktion und beziehen ihre gesamte Antriebsenergie aus dem Stromnetz.
- Plug-in-Hybridfahrzeuge: Sie haben wie die batterieelektrischen Pkw einen Elektroantrieb und die Möglichkeit, ihre Batterien mit Elektrizität aus dem Stromnetz aufzuladen. Darüber hinaus verfügen sie jedoch auch über einen kompletten konventionellen Antriebsstrang.
- Elektrofahrzeuge mit Reichweitenvergrößerer (Range Extender): Sie verfügen über einen Hilfs-Verbrennungsmotor, der im Bedarfsfall zur Aufladung der Fahrzeugbatterie eingesetzt werden kann.

Gemeinsames Merkmal dieser drei Fahrzeugtypen ist, dass sie Antriebsenergie aus dem Stromnetz beziehen können. Im Gegensatz dazu werden Hybridfahrzeuge ohne Netzanschlussmöglichkeit hier nicht betrachtet.

Es werden folgende Lademöglichkeiten für Elektro-Pkw unterschieden:

- Vollständig nutzergetrieben beziehungsweise ungesteuert: Die Elektroautos werden unmittelbar nach Herstellung der Netzverbindung mit maximaler Ladeleistung so lange aufgeladen, bis die Batterien komplett geladen sind.
- Vollständig kostengetrieben beziehungsweise optimiert: Die Fahrzeuge werden unter der Annahme perfekter Voraussicht so aufgeladen, dass mindestens die jeweils nächste elektrische Fahrt möglich ist. Dabei erfolgt die

Aufladung während der Standzeiten der Pkw so, dass die Systemkosten minimiert werden. Somit werden die Fahrzeugbatterien in solchen Stunden aufgeladen, in denen die Großhandelspreise für Strom besonders niedrig sind.

- Teilweise nutzergetrieben: Die Elektro-Pkw werden nach Herstellung der Netzverbindung so schnell wie möglich auf einen definierten Batterieladestand gebracht, beispielsweise auf 50 Prozent. Darüber hinaus kann die weitere Aufladung wie im kostengetriebenen Fall erfolgen.

Die Systemkosten umfassen hier die variablen Kosten des Kraftwerkeinsatzes. Dazu gehören insbesondere Brennstoff- und CO₂-Kosten sowie Anfahrkosten von Kraftwerken. Nicht berücksichtigt sind Kapitalkosten und andere fixe Kosten, da von einem bestehenden Kraftwerkspark ausgegangen wird.

Es werden verschiedene Szenarien betrachtet, die sich in Hinblick auf die Zahl der Elektro-Pkw unterscheiden:

- Vergleichsszenario ohne Elektrofahrzeuge
- Business-as-usual (BAU): knapp vier Millionen Elektrofahrzeuge im Jahr 2030.
- Electromobility* (EM*): rund fünf Millionen Elektrofahrzeuge im Jahr 2030.
- Renewable Energy* (RE*): Elektrofahrzeuge wie in EM*.

In den Szenarien wird jeweils der gleiche Kraftwerkspark unterstellt; lediglich im Szenario RE* wird von einem zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien ausgegangen.

der die Reichweite rein batterieelektrischer Pkw mehr als viermal in einem Jahr überschritten wird, bei über 70 Prozent liegt.

In der Befragung zeigte sich grundsätzlich eine hohe Akzeptanz der Elektromobilität. Das daraus abgeleitete Marktpotential elektrischer Pkw liegt im betrachteten Zeitraum bei ungefähr 50 Prozent der Neuzulassungen im BAU-Szenario und bei circa 60 Prozent im EM*-Szenario. Die Akzeptanz von Plug-in-Hybridfahrzeugen beziehungsweise Elektro-Pkw mit Range Extender ist dabei höher als die rein batterieelektrischer Pkw. Bei der Simulation künftiger Marktanteile wurden über einen sogenannten Diffusionsfaktor auch weitere Hemmnisse wie der notwendige Aufbau der Produktionskapazitäten und die derzeit noch geringe Modellvielfalt berücksichtigt. Dadurch liegt der Marktanteil bei den Neuzulassungen unter dem Marktpotential.

In den Szenarien liegt der Marktanteil elektrischer Pkw bei den Neuzulassungen im Jahr 2020 bei fünf bis sechs Prozent; er steigt bis zum Jahr 2030 auf 20 bis 25 Prozent. Im Vergleich zu batterieelektrischen Pkw haben Plug-in-Hybridfahrzeuge und Range-Extender-Fahrzeuge deutlich höhere Anteile. Im Jahr 2020 ergibt sich ein Bestand elektrischer Fahrzeuge von rund 0,4 Millionen (BAU) beziehungsweise 0,5 Millionen (EM*). Die Flottengröße elektrischer Pkw steigt im BAU-Szenario bis 2030 auf knapp vier Millionen und im EM*-Szenario auf rund fünf Millionen Elektrofahrzeuge, was 13 Prozent des gesamten Pkw-Bestands entspricht (Abbildung 1).¹²

¹² Die Szenarien wurden im europäischen Projektverbund mit einer gemeinsamen Methodik definiert. Die Erreichung der Ziele der Bundesregierung war dabei keine Randbedingung. Die Szenarien sind nicht als Prognose der Erreichung oder Verfehlung der Ziele der Bundesregierung zu interpretieren.

Kasten 2

Methodik der Analyse

Für die Analyse wurden neben Befragungen und anderen empirischen Erhebungen zwei numerische Modelle eingesetzt: ein Kraftwerkseinsatzmodell des DIW Berlin und ein Verkehrssektormodell des Öko-Instituts.

Der Kraftwerkseinsatz wurde mit einem gemischt-ganzzahligen Kostenminimierungsmodell simuliert, das einzelne Kraftwerksblöcke ab einer Leistung von 100 Megawatt detailliert abbildet.¹ Es beinhaltet die Flexibilitätsrestriktionen von Kraftwerken durch die Berücksichtigung von Anfahrkosten, Mindestlastbedingungen sowie Mindeststillstandszeiten. Das Modell hat eine stündliche Auflösung und wird sequentiell in Schritten von vier Wochen für ein komplettes Jahr gelöst. Wesentliche Eingangsparameter sind der thermische Kraftwerkspark sowie zeitlich variierende Erzeugungsmöglichkeiten erneuerbarer Energien, die auf historischen Einspeisedaten basieren. Weitere wichtige Inputparameter sind die zeitlichen Profile des Energieverbrauchs und der maximalen Ladeleistungen von Elektrofahrzeugen. Dazu wurden auf Basis repräsentativer Mobilitätsdaten 28 verschiedene Fahrzeugnutzungs- und -ladeprofile generiert und anteilig auf die Flottengröße des jeweiligen Szenarios hochgerechnet. Weitere techno-ökonomische Parameter sind der Datenbank des DIW Berlin und den Netzentwicklungsplänen entnommen.²

Die Analyse des Kraftwerkseinsatzes beschränkt sich auf Deutschland beziehungsweise den deutschen Großhandelsmarkt für Strom. Es wird, passend zum Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans, davon ausgegangen, dass es keine innerdeutschen Netzengpässe gibt. Von Interaktionen mit Nachbarländern wird ebenfalls abstrahiert. Dies dürfte tendenziell zu einer Überschätzung des Flexibilitätsbeitrags von Elektrofahrzeugen im Stromsystem führen. Würde stattdessen ein umfangreicher europäischer Stromaustausch

¹ Die vollständige Modellformulierung und die Datenquellen sind in Schill, W.-P., Gerbaulet, C. (2015), a. a. O. enthalten.

² Vgl. 50Hertz et al. (2013), a. a. O.

angenommen, so dürften die Braun- und Steinkohlekraftwerke in Deutschland bereits im Referenzfall stärker ausgelastet sein als hier berechnet. Entsprechend dürfte der Braunkohleanteil des Ladestroms insbesondere bei der kostenoptimierten Fahrzeugaufladung tendenziell überschätzt sein.

Bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen wird die Entscheidung über den elektrischen oder konventionellen Antriebsmodus nicht detailliert modelliert; stattdessen wird pauschal angenommen, dass der elektrische Anteil der Fahrten maximiert werden soll.

In Hinblick auf die Netzintegration elektrischer Pkw wurde die gesteuerte Aufladung von Elektrofahrzeugen betrachtet („Grid-to-Vehicle“), nicht jedoch die Option der Rückspeisung von Elektrizität aus den Fahrzeugbatterien in das Stromnetz („Vehicle-to-Grid“). Diverse Studien deuten darauf hin, dass die Rückspeisung vor allem für den Regelleistungsbereich relevant werden könnte, der in dieser Analyse jedoch nicht betrachtet wird.

Das Verkehrssektormodell „Transport Emissions and Policy Scenarios“ (TEMPS) des Öko-Instituts ermöglicht es, den Endenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen des Verkehrs für unterschiedliche Szenarien zu quantifizieren und dabei Veränderungen bei der Verkehrsnachfrage, dem Fahrzeugbestand und dem Kraftstoffeinsatz abzubilden. Szenarien zur Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr werden parametergestützt auf Basis der Entwicklung zentraler Mobilitätskenngrößen (Wegeanzahl, Wegelängen, Modal Split im Personen- und Güterverkehr sowie Transportweiten) ermittelt und gehen als Inputgrößen in das Modell ein. Die Technologiedatenbasis dokumentiert mögliche technische Entwicklungen des jeweiligen Verkehrsträgers bis zum Jahr 2050 differenziert nach Größenklasse und Antriebskonzept. Die künftige Effizienzentwicklung im Straßenverkehr wird über ein Neuzulassungs- und Bestandsmodell berechnet. Dadurch kann beispielsweise die Wirkung von CO₂-Emissionsstandards oder von Maßnahmen zur Förderung alternativer Technologien auf die Bestandszusammensetzung analysiert werden.

Simulation der Auswirkungen auf das Stromsystem mit einem Kraftwerkseinsatzmodell

Die Auswirkungen der jeweiligen Elektrofahrzeugflotten in den vom Öko-Institut entworfenen Szenarien auf das deutsche Stromsystem wurden mit einem Kraftwerkseinsatzmodell des DIW Berlin untersucht (Kasten 2).¹³ Die

¹³ Für weitere Details zur Kraftwerkseinsatzmodellierung vgl. Schill, W.-P., Gerbaulet, C. (2015): Power System Impacts of Electric Vehicles in Germany: Charging with Coal or Renewables? DIW Discussion Papers Nr. 1442.

Stromerzeugungsleistungen unterschiedlicher Technologien für die Jahre 2020 und 2030 wurden aus dem Szenariorahmen des deutschen Netzentwicklungsplans¹⁴ abgeleitet (Abbildung 2).

Im Modell wird ein für das Stromsystem kostenminimierender Kraftwerkseinsatz unter Berücksichti-

¹⁴ Als Basis diente das mittlere Szenario B des Netzentwicklungsplans des Jahres 2013. 50Hertz et al. (2013): Netzentwicklungsplan Strom. Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. 17.7.2013.

gung der notwendigen Aufladung von Elektrofahrzeugen ermittelt. Dabei lassen sich zwei extreme Aufladestrategien unterscheiden (Kasten 1): Im vollständig nutzergetriebenen (ungesteuerten) Lademodus werden Elektrofahrzeuge so schnell wie möglich vollständig aufgeladen, sobald sie mit dem Stromnetz verbunden sind. Im vollständig kostengetriebenen (optimierten) Modus kann die Aufladung dagegen innerhalb der durch die zeitlichen Nutzungsprofile der Fahrzeuge gesetzten Grenzen verschoben werden, wodurch die im Stromsystem entstehenden Kosten der Aufladung minimiert werden. Zudem erlaubt das Modell die Simulation von teilweise nutzergetriebenen (teiloptimierten) Ladestrategien, bei denen nur ein Teil der Batteriekapazität nach Verbindung mit dem Stromnetz so schnell wie möglich aufgeladen werden muss.

Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge gering, Ladeleistungen aber teilweise kritisch

Der jährliche Energiebedarf der zukünftigen Elektrofahrzeugflotten ist im Vergleich zur gesamten Stromnachfrage gering. Im Jahr 2020 erfordert die Elektromobilität je nach Ladestrategie nur ein bis zwei Promille der gesamten Stromnachfrage. Bis zum Jahr 2030 steigen diese Anteile auf 1,2 bis 1,6 Prozent beziehungsweise sieben bis neun Terawattstunden.¹⁵

Im Gegensatz zum gesamten Energieverbrauch der elektrischen Pkw können ihre stündlichen Ladeleistungen jedoch sehr hoch werden. Sie variieren erheblich zwischen einzelnen Stunden und unterscheiden sich stark zwischen dem nutzergetriebenen und dem kostengetriebenen Lademodus. Die rein nutzergetriebene Aufladung erfolgt überwiegend tagsüber und in den Abendstunden (Abbildung 3). Dies kann zu einer deutlichen Steigerung der Spitzenlast des Stromsystems führen, was schwerwiegende Konsequenzen für die Systemsicherheit nach sich ziehen kann. Bei einer vollständig nutzergetriebenen Aufladung gibt es sowohl im BAU- als auch im EM⁺-Szenario des Jahres 2030 mehrere Stunden, in denen die angenommenen, auf dem Netzentwicklungsplan basierenden Stromerzeugungskapazitäten vollständig ausgeschöpft werden.¹⁶

Im Gegensatz dazu verschiebt sich im kostengetriebenen Modus die abendliche Spitze des Aufladeprofiles in die Nacht, während der die Stromnachfrage gering ist,

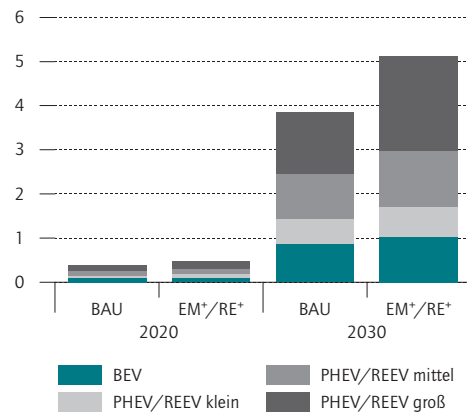
¹⁵ Im Vergleich dazu betrug der Endenergieverbrauch im elektrischen Bahnbetrieb in Deutschland im Jahr 2012 knapp neun Terawattstunden im Personenverkehr und zwischen drei und vier Terawattstunden im Güterverkehr. Vgl. IFEU (2014), a. a. O.

¹⁶ Die Lösbarkeit des Modells in diesen Spitzenstunden wird durch eine stilisierte, sehr teure Spitzenlasttechnologie gewährleistet. In der Wirklichkeit wären ein entsprechender Lastabwurf, die Vorhaltung einer Kapazitätsreserve oder der Import von Strom aus dem Ausland erforderlich.

Abbildung 1

Bestand elektrischer Pkw in den Szenarien

In Millionen Fahrzeugen



BEV: Rein batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles). PHEV/REEV: Plug-in-Hybridfahrzeuge und Fahrzeuge mit Reichweitenvergrößerer (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, Range Extended Electric Vehicles).

Quelle: Kasten, P., Hacker, F. (2014), a. a. O.

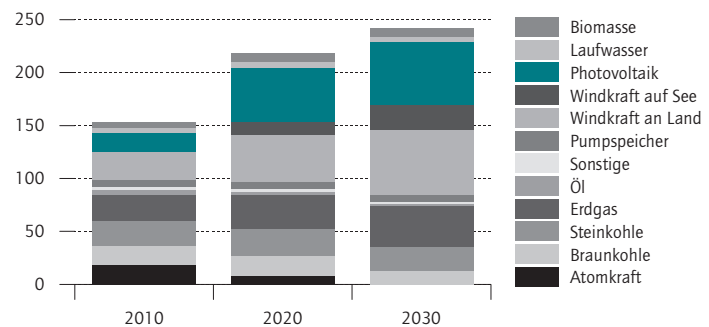
© DIW Berlin 2015

Plug-in-Hybride und Elektro-Pkw mit Reichweitenvergrößerer haben die größten Anteile.

Abbildung 2

Installierte Stromerzeugungsleistungen

In Gigawatt



Quelle: Schill, W.-P., Gerbaulet, C. (2015), a. a. O., basierend auf 50Hertz et al. (2013), a. a. O.

© DIW Berlin 2015

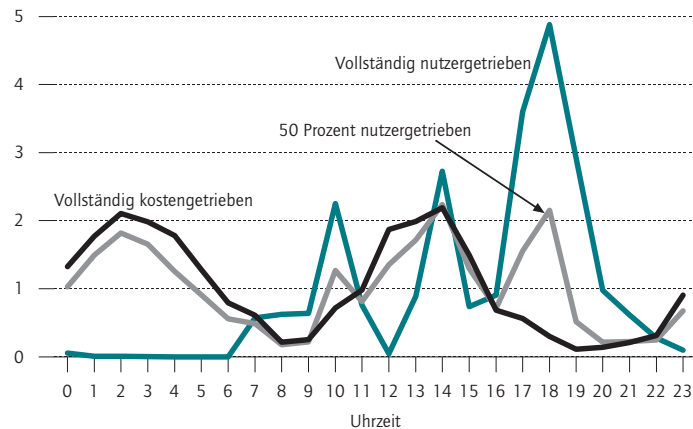
Die Leistung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen steigt stark an.

sowie in die Mittagsstunden, in denen die Stromerzeugung der Photovoltaik hoch ist. Das durchschnittliche Ladeprofil ist bei kostenoptimierter Aufladung insgesamt wesentlich gleichmäßiger als im komplett nutzergetriebenen Modus, wodurch es auch zu einer deutlich geringeren Nachfragerhöhung in den Spitzenlastperioden kommt.

Abbildung 3

Durchschnittliche Ladeleistung über 24 Stunden im Jahr 2030

In Gigawatt



Dargestellt ist beispielhaft das Szenario EM*.

Quelle: Schill, W.-P., Gerbaulet, C. (2015), a. a. O.

© DIW Berlin 2015

Die vollständig nutzergetriebene Aufladung erfolgt vor allem in den Abendstunden.

Im Vergleich zur vollkommen ungesteuerten Aufladung kommt es bereits bei einer teiloptimierten Aufladung, bei der zum Beispiel nur die Hälfte der Batteriekapazität unmittelbar nach Herstellung der Netzverbindung so schnell wie möglich aufgeladen werden muss, zu einer deutlichen Glättung des durchschnittlichen Ladeprofils.

Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge abhängig vom Lademodus

Die unterschiedlichen zeitlichen Aufladeprofile gehen mit entsprechenden Änderungen im Kraftwerkseinsatz einher. Elektrofahrzeuge können grundsätzlich sowohl die Auslastung von emissionsintensiven Erzeugungstechnologien wie Braun- und Steinkohle erhöhen als auch temporäre Überschüsse fluktuierender erneuerbarer Energien aufnehmen.

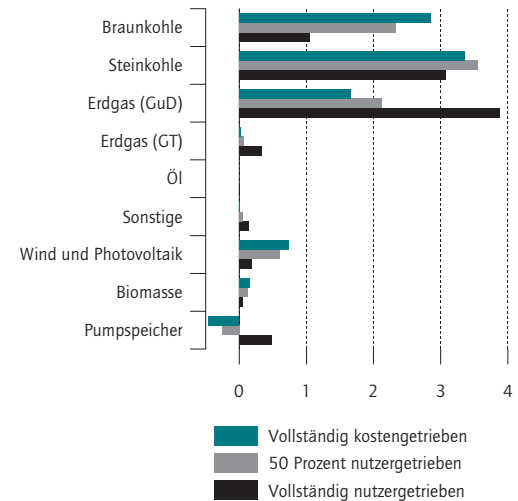
Im EM*-Szenario des Jahres 2030¹⁷ erhöht sich bei einer kostengetriebenen Ladestrategie vor allem die Auslastung von Stein- und Braunkohlekraftwerken deutlich gegenüber einem Szenario ohne Elektrofahrzeuge (Abbildung 4). Bei einer vollständig nutzergetriebenen Aufladung, die häufig in solchen Stunden stattfindet, in denen Braunkohlekraftwerke bereits voll ausgelastet sind, stammt die zusätzliche Stromerzeugung überwiegend aus erdgasbefeuerten Gas- und Dampfkraftwerken

¹⁷ In diesem Szenario sind die Effekte am deutlichsten. Im Szenario BAU 2030 sowie in den Szenarien des Jahres 2020 zeigen sich qualitativ ähnliche, aber weniger ausgeprägte Effekte.

Abbildung 4

Änderungen des Kraftwerkseinsatzes gegenüber einem Szenario ohne Elektrofahrzeuge im Jahr 2030

In Terawattstunden



Dargestellt ist exemplarisch das Szenario EM*.

GuD: Gas- und Dampfturbinen; GT: Offene Gasturbinen.

Quelle: Schill, W.-P., Gerbaulet, C. (2015), a. a. O.

© DIW Berlin 2015

Die kostenoptimierte Aufladung führt zu einer deutlichen Erhöhung der Kohleverstromung.

sowie Steinkohlekraftwerken und in deutlich geringem Umfang aus Braunkohlekraftwerken.

Die Integration erneuerbarer Energien verbessert sich in beiden Fällen nur leicht, da kaum Stromüberschüsse vorliegen; das heißt, die Stromerzeugung der in den Szenarien angenommenen Windkraft- und Photovoltaikanlagen kann bereits im Fall ohne Elektrofahrzeuge fast vollständig vom Stromsystem aufgenommen werden. Die kostenoptimierte Aufladung erlaubt dabei eine etwas größere Steigerung der Nutzung erneuerbarer Energien, da die Aufladung teilweise in Stunden mit Stromüberschüssen aus Windkraft- oder Photovoltaikanlagen verschoben werden kann.

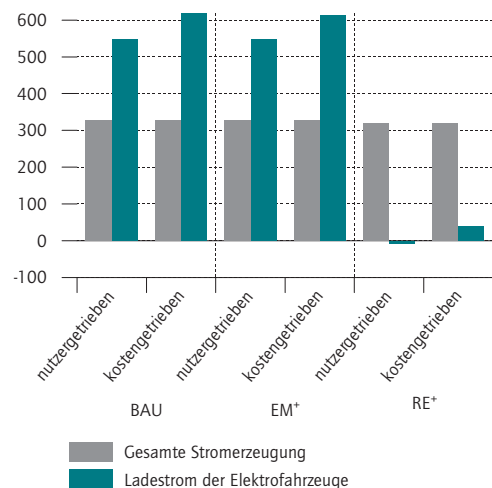
Treibhausgasemissionen des Ladestroms überdurchschnittlich hoch

Die spezifischen CO₂-Emissionen der zusätzlichen Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen hängen sowohl vom zugrunde liegenden Kraftwerkspark als auch von der Ladestrategie ab. Wenn Elektrofahrzeuge zu einer erhöhten Auslastung von emissionsintensiven Erzeugungstechnologien wie Braun- und Steinkohle führen, steigen die spezifischen CO₂-Emissionen; können Elektrofahrzeuge dagegen zusätzliche erneuerbare Energien nutzen, sinken sie. In den BAU- und EM*-Szenarien der

Abbildung 5

Spezifische CO₂-Emissionen der Stromerzeugung im Jahr 2030

In Gramm pro Kilowattstunde



Quelle: Schill, W.-P., Gerbaulet, C. (2015), a. a. O.

© DIW Berlin 2015

Ohne einen zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien ist der Ladestrom überdurchschnittlich CO₂-intensiv.

Jahre 2020 und 2030 dominiert die zusätzliche Kohleverstromung; dies gilt insbesondere bei einer kostengetriebenen Ladestrategie. Die spezifischen Emissionen der durch die Elektrofahrzeuge verursachten zusätzlichen Stromnachfrage („Ladestrom“) sind daher – unabhängig vom Auflademodus – deutlich höher als die des gesamten Strommixes (Abbildung 5).¹⁸

In einem weiteren Szenario, genannt „Renewable Energy“ (RE+), wird die Einführung der Elektromobilität direkt mit einem zusätzlichen, über die aus dem Netzentwicklungsplan abgeleiteten Kapazitäten hinausgehenden Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten verknüpft. Diese zusätzlichen Kapazitäten sind so gewählt, dass ihre jährliche Gesamtstromerzeugung die Stromnachfrage der Elektrofahrzeugflotte bilanziell genau abdeckt. Wollte man den Strombedarf der Fahrzeuge beispielsweise ausschließlich durch zusätzliche Photovoltaikanlagen decken, wäre im Szenario 2030 (EM+) zusätzlich zu den annahmegemäß bereits bestehenden 59 Gigawatt ein Zubau von ungefähr 13 bis 14 Gigawatt erforderlich. In diesem Szenario liegen die

spezifischen Emissionen der Fahrzeugaufladung praktisch bei null.

Vorteilhafte Netto-CO₂-Bilanz der Elektromobilität bei zusätzlichem Ausbau erneuerbarer Energien

Die Einführung der Elektromobilität führt grundsätzlich zu einer Verlagerung der CO₂-Emissionen vom Verkehrsbereich in den Stromsektor. Die Elektromobilität weist dann eine vorteilhafte Netto-CO₂-Bilanz auf, wenn durch den Einsatz elektrisch angetriebener Pkw anstelle von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen im Straßenverkehr mehr Emissionen eingespart werden können, als im Kraftwerksbereich durch die zusätzliche Stromproduktion neu entstehen.¹⁹ Eine Analyse mit dem Modell TEMPS (Kasten 2), in die die CO₂-Emissionen des Stromsektors einfließen, zeigt, dass die Nettobilanz stark von den getroffenen Annahmen abhängt.

Im BAU-Szenario des Jahres 2030 wird die durch Elektrofahrzeuge bedingte CO₂-Reduktion im Straßenverkehr durch Mehremissionen im Stromsektor überkompensiert. Insgesamt steigen die CO₂-Emissionen im Vergleich zu einem Szenario ohne Elektromobilität je nach Lademodus um 1,0 beziehungsweise 1,6 Millionen Tonnen (Abbildung 6). Dies entspricht rund einem Prozent der derzeitigen CO₂-Emissionen der Pkw in Deutschland.²⁰ Im EM+-Szenario dagegen wird eine Netto-CO₂-Einsparung erreicht; die Emissionen reduzieren sich um 1,3 beziehungsweise 2,1 Millionen Tonnen. Dies entspricht bis zu zwei Prozent der derzeitigen Pkw-bedingten CO₂-Emissionen. Allerdings wird diese Einsparung dadurch verursacht, dass im EM+-Szenario gegenüber dem Szenario ohne Elektrofahrzeuge (und auch gegenüber dem BAU-Szenario) annahmegemäß deutlich strengere CO₂-Grenzwerte für konventionelle Pkw gelten. In beiden Szenarien sind die spezifischen CO₂-Emissionen der durch die elektrischen Pkw verursachten zusätzlichen Stromnachfrage im Jahr 2030 höher als die der verbrennungsmotorischen Pkw. Dies bedeutet, dass die angenommenen Effizienzverbesserungen beziehungsweise Emissionsminderungen bei konventionellen Pkw größer sind als die Auswirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf die CO₂-Emissionen des Ladestroms.

Dieser Befund gilt allerdings nicht mehr, wenn die Einführung der Elektromobilität mit zusätzlichen Kapazitäten erneuerbarer Stromerzeuger verknüpft

¹⁸ Die ermittelten Effekte hängen stark von der Struktur des Kraftwerksparks und der Relevanz der Abregelung erneuerbarer Energien ab. In Zukunft könnte sich die Emissionsbilanz der kostengetriebenen Aufladung deutlich verbessern, wenn emissionsintensive Kraftwerke das System verlassen und die Abregelung erneuerbarer Stromerzeuger an Bedeutung gewinnt.

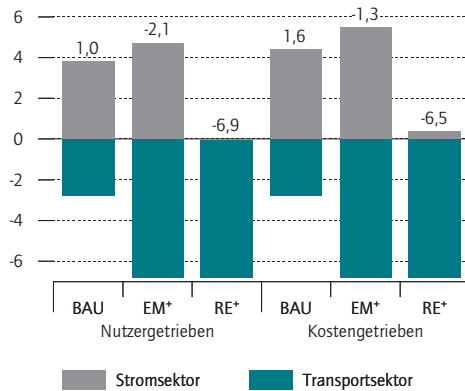
¹⁹ Mögliche Veränderungen der Fahrleistungen oder der Größenklassenstruktur des Fahrzeugbestands wurden hier nicht betrachtet. Somit wurde in allen Szenarien die gleiche Fahrleistung unterstellt.

²⁰ Die direkten CO₂-Emissionen der Pkw in Deutschland betragen im Jahr 2010 rund 110 Millionen Tonnen.

Abbildung 6

Netto-CO₂-Bilanz von Verkehrs- und Stromsektor im Jahr 2030

In Millionen Tonnen CO₂



Dargestellt sind die Ergebnisse der jeweiligen Szenarien im Vergleich zu einem Referenzszenario ohne Elektromobilität und ohne zusätzliche erneuerbare Energien.
Quelle: Kasten, P., Hacker, F. (2014), a. a. O.

© DIW Berlin 2015

Emissionsminderungen im Verkehrssektor stehen gesteigerte Emissionen im Stromsektor gegenüber.

wird (RE⁺). Die elektrischen Pkw sind im Stromsektor in diesen Simulationsläufen im Jahr 2030 nahezu CO₂-neutral. Die Netto-CO₂-Bilanz weist dementsprechend eine Verringerung von 6,5 bis 6,9 Millionen Tonnen CO₂ gegenüber einem Szenario ohne Elektromobilität auf (gut sechs Prozent der derzeitigen Pkw-Emissionen in Deutschland). Damit wird das CO₂-Minderungspotential der Elektromobilität weitgehend ausgeschöpft.

Fazit und energiepolitische Schlussfolgerungen

Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts wurden am DIW Berlin die Auswirkungen der Elektromobilität auf das deutsche Stromsystem und die CO₂-Bilanz von Elektrofahrzeugen untersucht. Auf Basis der Modellergebnisse lassen sich mehrere energiepolitische Schlussfolgerungen ableiten.

Erstens ist der Gesamtstromverbrauch künftiger Elektrofahrzeugflotten grundsätzlich als unproblematisch einzuschätzen, die möglichen Leistungsspitzen der Fahrzeugaufladung können aber beträchtlich sein. Zur Vermeidung problematischer Lastspitzen ist eine systemkostenoptimierte Fahrzeugaufladung einem ungesteuerten Lademodus, bei dem die Elektroautos nach der Verbindung mit dem Stromnetz so schnell wie möglich vollständig aufgeladen werden, klar vorzuziehen. Aufgrund begrenzter Stromerzeugungs-

kapazitäten könnte es künftig erforderlich werden, eine solche rein nutzergesteuerte Aufladung regulatorisch einzuschränken, spätestens wenn die Fahrzeugflotten so groß werden wie in den Szenarien des Jahres 2030 unterstellt. Bereits eine nur teilweise optimierte Ladestrategie könnte zu erheblichen Verbesserungen führen.

Zweitens verdeutlichen die Modellergebnisse, dass eine optimierte Fahrzeugaufladung die Systemintegration erneuerbarer Energien verbessern, jedoch auch die Auslastung von Stein- und Braunkohlekraftwerken erhöhen kann. Wird die Einführung der Elektromobilität politisch mit der Nutzung erneuerbarer Energien verknüpft, so muss sichergestellt werden, dass ein entsprechender – über bestehende Szenarien hinausgehender – zusätzlicher Ausbau erneuerbarer Energien erfolgt. Im Hinblick auf die CO₂-Emissionen ist dies besonders wichtig, solange noch erhebliche und zunehmend unterausgelastete Kapazitäten emissionsintensiver Stromerzeugungstechnologien am Netz sind. Dabei spielt es aus einer Systemperspektive keine Rolle, ob die zusätzliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien durch eine passgenaue Ladestrategie vollständig von den Elektrofahrzeugen selbst aufgenommen wird, oder ob sie anteilig zur Deckung der sonstigen Stromnachfrage beiträgt.

Drittens kann eine kostenoptimierte Aufladung nur dann zu emissionsoptimalen Ergebnissen führen, wenn die externen Kosten der Emissionen adäquat im Großhandelspreis für Strom berücksichtigt sind. Andernfalls kann eine kostenoptimierte Aufladung zu überdurchschnittlich hohen spezifischen CO₂-Emissionen führen und sogar zu höheren Emissionen als eine ungesteuerte Aufladung. Falls es der Politik nicht gelingen sollte, CO₂-Emissionen hinreichend zu bepreisen, müssten andere, emissionsorientierte Ladestrategien verfolgt werden, die theoretisch denkbar wären, deren Implementierung in der Praxis aber äußerst unwahrscheinlich sein dürfte.

Die Einführung der Elektromobilität sollte jedoch nicht nur im Hinblick auf kurz- bis mittelfristige CO₂-Emissionseffekte bewertet werden. Elektrofahrzeuge können eine Reihe weiterer Vorteile mit sich bringen, beispielsweise geringere lokale Emissionen von anderen Luftschadstoffen und eine verminderte Abhängigkeit von Erdöl im Verkehrsbereich. Insbesondere sind sie eine mögliche Option zur Nutzung heimischer erneuerbarer Energien ohne den Umweg der Biokraftstoffe. In einer langfristigen Perspektive jenseits des Jahres 2030 eröffnen batterieelektrische Pkw neben weiteren alternativen Antriebskonzepten und Kraftstoffarten die Option eines weitgehend emissionsfreien und auf erneuerbaren Energien basierenden Straßenverkehrs.

WolfPeter Schill ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | wschill@diw.de

Clemens Gerbaulet ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin und Gastwissenschaftler in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | cgerbaulet@diw.de

Peter Kasten ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Infrastruktur & Unternehmen am Öko-Institut | p.kasten@oeko.de

ELECTROMOBILITY IN GERMANY: CO₂ BALANCE DEPENDS ON CHARGING ELECTRICITY

Abstract: The German government plans to significantly increase deployment of electric vehicles. What impact would this have on the country's power system and carbon emissions? This question was addressed as part of a European research project analyzing various scenarios up to 2030. One of the key findings of the study is that total annual power consumption of the four to five million electric vehicles (depending on the scenario) would be small. However, recharging the vehicles, particularly in an uncontrolled charging mode, which involves the car being fully recharged as rapidly as possible after being connected to the electricity grid, would result in problematic peak loads in the power

system. The type of additional power generation required for electric vehicles also largely depends on the charging mode. For example, a charging mode that minimizes system costs would use a particularly high share of power from hard-coal- and lignite-fired plants, which, in turn, would result in an above-average level of specific carbon emissions of the charging electricity. If the electricity and transport sectors are both considered, it becomes evident that the introduction of electromobility would result in a significant net reduction in carbon emissions only if linked with an additional expansion of renewable energy sources compared to current plans.

JEL: Q42, R41, Q54

Keywords: Electric vehicles, power system modelling, carbon emissions



DIW Berlin – Deutsches Institut
für Wirtschaftsforschung e.V.
Mohrenstraße 58, 10117 Berlin
T +49 30 897 89 -0
F +49 30 897 89 -200
82. Jahrgang

Herausgeber

Prof. Dr. Pio Baake
Prof. Dr. Tomaso Duso
Dr. Ferdinand Fichtner
Prof. Marcel Fratzscher, Ph.D.
Prof. Dr. Peter Haan
Prof. Dr. Claudia Kemfert
Dr. Kati Krähnert
Prof. Karsten Neuhoff, Ph.D.
Prof. Dr. Jürgen Schupp
Prof. Dr. C. Katharina Spieß
Prof. Dr. Gert G. Wagner

Chefredaktion

Sabine Fiedler
Dr. Kurt Geppert

Redaktion

Renate Bogdanovic
Andreas Harasser
Sebastian Kollmann
Dr. Claudia Lambert
Marie Kristin Marten
Dr. Anika Rasner
Dr. Wolf-Peter Schill

Lektorat

Dr. Uwe Kunert
Dr. Sebastian Schwenen

Pressestelle

Renate Bogdanovic
Tel. +49-30-89789-249
presse@diw.de

Vertrieb

DIW Berlin Leserservice
Postfach 74
77649 Offenburg
leserservice@diw.de
Tel. (01806) 14 00 50 25
20 Cent pro Anruf
ISSN 0012-1304

Gestaltung

Edenspiekermann

Satz

eScriptum GmbH & Co KG, Berlin

Druck

USE gGmbH, Berlin

Nachdruck und sonstige Verbreitung –
auch auszugsweise – nur mit Quellen-
angabe und unter Zusendung eines
Belegexemplars an die Serviceabteilung
Kommunikation des DIW Berlin
(kundenservice@diw.de) zulässig.

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier.