



*Electromobility*<sup>+</sup>



## **SYNTHESEBERICHT**

DEFINE - Development of an Evaluation Framework for the In-  
troduction of Electromobility

**IHS Wien, Umweltbundesamt, TU Wien, DIW Berlin, Öko-Institut, CASE**

**März 2015**



# SYNTHESEBERICHT

## DEFINE - Development of an Evaluation Framework for the Introduction of Electromobility

### Projektkoordinator

Institut für Höhere Studien



### Projektpartner

Technische Universität Wien



Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung



Center for Social and Economic Research



Umweltbundesamt



Öko-Institut



### Fördergeber

EU-Kommission sowie nationale Fördergeber:

Österreich: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) - Abwicklung über österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG )

Deutschland: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Polen: The National Centre for Research and Development



**Projektlaufzeit:** Mai 2012 – Dezember 2014, Ausschreibung: Electromobility+

**Projekthomepage:** <https://www.ihs.ac.at/projects/define>

**Kontakt:**

Mag. Michael Gregor Miess

☎: +43/1/599 91-138

email: [miess@ihs.ac.at](mailto:miess@ihs.ac.at)

Mag. Stefan Schmelzer

☎: +43/1/599 91-138

email: [schmelzer@ihs.ac.at](mailto:schmelzer@ihs.ac.at)

---

# Inhaltsverzeichnis

1. DEFINE - Projektkurzbeschreibung.....	3
2. Elektromobilitätsszenarien und Fahrzeugbestand für Österreich .....	5
3. Elektromobilitätsszenarien für Deutschland und ihre Auswirkungen auf das deutsche Stromsystem bis 2030 .....	8
4. Simulation der Auswirkungen von Elektromobilität auf das Stromsystem für Österreich und Deutschland 2030.....	16
5. Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz durch Integration von Elektrofahrzeugen (Szenarien bis 2030).....	22
6. Ökonomische Kosten und Nutzen von Elektromobilität.....	25
6.1. Einleitung.....	25
6.2. Modellsimulationen .....	26
6.3. Schlussfolgerungen .....	34
7. Externe Kosten von Elektromobilität .....	37
7.1. Verfahrensweise.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
7.2. Ergebnisse für Sektoren .....	38
7.3. Ergebnisse: Externe Gesamtkosten.....	39
8. Präferenzen für alternativ betriebene Fahrzeuge in Polen.....	42
8.1. Motivation und Ziele.....	42
8.2. Ergebnisse der Literaturrecherche .....	43
8.3. Ergebnisse aus der Studie in Polen .....	44



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Identifizierte NutzerInnengruppen .....	6
Abbildung 2: Bestandsentwicklungen und Einsparungen an CO <sub>2</sub> -Emissionen in den zwei Szenarien.....	7
Abbildung 3: Bestand elektrischer Pkw im BAU- und im EM+ Szenario .....	10
Abbildung 4: Durchschnittliche Ladeleistung über 24 Stunden .....	11
Abbildung 5: 2030 EM+: Änderungen im Kraftwerkseinsatz gegenüber einem Szenario ohne Elektrofahrzeuge.....	12
Abbildung 6: Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der Stromerzeugung in den Szenarien des Jahres 2030 .....	13
Abbildung 7: Netto-CO <sub>2</sub> -Bilanz von Verkehrs- und Stromsektor für 2030 (in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> , Vergleich zu Szenario ohne Elektromobilität und ohne zusätzliche erneuerbare Energien) .....	14
Abbildung 8: Stromerzeugung und Verbrauch Österreich + Deutschland im Sommer 2030 .....	18
Abbildung 9: Stromerzeugung und Verbrauch Österreich + Deutschland im Winter 2030 .....	18
Abbildung 10: Vollladezyklen für die 100 simulierten E-Mobilitätsfahrprofile .....	19
Abbildung 11: Der V2G-Einsatz über die 8760 Stunden des simulierten Jahres. ....	19
Abbildung 12: Dauerlinien der E-Mobilitätsladeleistung in den Szenarien marktgesteuertes und häufiges Laden mit V2G (MG&HL+V2G) und ungesteuertes und häufiges Laden UG&HL. ....	19
Abbildung 13: Verlauf der Neuzulassungen im BAU Szenario nach Jahren .....	28
Abbildung 14: Bruttoinlandsprodukt - BAU und EM+, positive und negative Effekte in Mrd. Euro pro Jahr .....	31
Abbildung 15: Vergleich Fahrzeugbestand im BAU und EM+ Szenario in Stückzahlen.....	32
Abbildung 16: Verlauf der Neuzulassungen in Stückzahlen im Elektromobilität Plus Szenario .....	33
Abbildung 17: Externe Gesamtkosten in Millionen EUR – direkte und indirekte Emissionen, 2008-2030, Österreich.....	40
Abbildung 18: Auswirkung des EM+ Szenarios auf die externen Gesamtkosten, welche direkten Emissionen zugeschrieben werden können, 2008-2030, Österreich.....	41
Abbildung 19: Auswertungsergebnisse – Gemischtes Logit-Modell für drei Haushaltssegmente, WTP-Platz .....	46

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Szenario-Annahmen 2030	Tabelle 2: Fahrzeugbestand in den Szenarien.....	17
-----------------------------------	--	----





## 1. DEFINE - Projektkurzbeschreibung

Das Projekt DEFINE - Development of an Evaluation Framework for the Introduction of Electromobility wurde vom Institut für höhere Studien, Wien, in Kooperation mit der Technischen Universität Wien, dem Umweltbundesamt (Österreich); dem Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin), dem Öko-Institut (Deutschland), sowie dem Center for Social and Economic Research (Polen) durchgeführt.

Elektromobilität wird oft als Lösung für die Verbindung des Individualtransports mit ökologisch nachhaltiger wirtschaftlicher Entwicklung gesehen. Hier sollte aber die Frage aufgeworfen werden: Unter welchen Bedingungen ist ein zunehmend auf Elektromobilität gestütztes Mobilitätsparadigma ökonomisch, energiesystemisch und ökologisch möglichst vorteilhaft und umsetzbar? Kann Elektromobilität die Wachstumsdynamik der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor unter volkswirtschaftlich vertretbaren Kosten brechen?

Die Analyse der gesamtwirtschaftlichen und systemischen Effekte einer verstärkten Durchdringung von Elektromobilität bedarf eines umfassenden Ansatzes. Aus diesem Grund war die Zielsetzung von DEFINE die Abschätzung der ökonomischen Kosten in einem analytischen Rahmen, der die Komplexität der Materie berücksichtigt und Elektromobilität explizit in Verbindung mit dem Energiesystem, Umweltauswirkungen und dem Verhalten der Haushalte setzt.

Hauptergebnisse des Projekts sind die ökonomischen Kosten einer erhöhten Durchdringung von Elektromobilität unter verschiedenen Anreizsystemen und steuerlichen Maßnahmen, die Auswirkungen auf das Stromsystem sowie das damit in Zusammenhang stehende Emissionsreduktionspotenzial. Der Kern des Projekts bestand in der Entwicklung eines modellgestützten Evaluationssystems, welches relevante Dimensionen von Elektromobilität sinnvoll verknüpft: die Wirtschaft in sektoraler Gliederung, die Konsum- und Mobilitätspräferenzen privater Haushalte bezüglich Elektromobilität, das Stromsystem, sowie die damit verbundenen Emissions- und Umwelteffekte für mehrere Länder Europas (Österreich, Deutschland, Polen).

In einem ersten Schritt wurden Szenarien der Marktdurchdringung von Elektromobilität und damit zusammenhängende Fahrzeugbestands-Prognosen des Umweltbundesamts (Österreich) und Öko-Instituts (Deutschland) entwickelt. Auf dieser Basis wurden die Auswirkungen einer verstärkten Durchdringung von Elektromobilität auf das Stromsystem mit detaillierten und umfassenden Strommarktmodellen der Technischen Universität (TU) Wien sowie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin) ermittelt.

Als methodisches Instrument für die Abschätzung ökonomischer Kosten wurde ein am Institut für Höhere Studien (IHS) Wien entwickeltes hybrides rechenbares allgemeines Gleichgewichtsmodell verwendet. Für eine realitätsnahe Darstellung des Individualtransports wurden aus der im Rahmen von DEFINE für Österreich durchgeführten repräsentativen Haushaltsumfrage die Präferenzen der Haushalte zu Kauf und Nutzung von Elektrofahrzeugen erhoben und ein diskretes Entscheidungsmodell geschätzt. Dieses wurde direkt in das Makromodell implementiert, wodurch eine wissenschaftliche Innovation erzielt werden konnte. Die Präferenzen der Haushalte bzgl. ihrer Mobilitätsentscheidung können nun besser im Modell abgebildet werden. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der detaillierten Strommarktmodelle der TU Wien und des DIW Berlin eingebettet. Damit konnte eine neuartige Methode für die Szenario-basierte Analyse der Kosten einer verstärkten Durchdringung von Elektromobilität unter einer systemischen Perspektive geschaffen werden.

Das Emissionsreduktionspotenzial von Elektromobilität für Österreich und Deutschland wurde von Umweltbundesamt und Öko-Institut abgeschätzt.

Die Arbeit des polnischen Partners CASE konzentrierte sich auf die Erhebung von Konsumpräferenzen von alternativ betriebenen Fahrzeugen. Diese Präferenzen wurden mittels einer eigens durchgeführten Umfrage ermittelt, die repräsentativ für die polnische erwachsene Bevölkerung und für Personen mit der Absicht, ein Fahrzeug zu erwerben, war. Die Zahlungsbereitschaft für alternativ betriebene Fahrzeuge und deren spezifische Attribute wie etwa Reichweite, Ladezeiten, Verfügbarkeit von Schnellladeinfrastruktur wurden von diskreten Entscheidungsexperimenten abgeleitet. Obwohl einige vergleichbare Studien in Westeuropa, Nordamerika und Asien durchgeführt wurden, ist diese die erste Studie dieser Art für Zentral- und Osteuropa. Zudem entwickelte CASE einen Ansatz, das hybride allgemeine Gleichgewichtsmodell mit einer Auswirkungsanalyse zu verknüpfen, um die externen Kosten und Nutzen (Umweltauswirkungen) in Bezug auf Luftqualität und Treibhausgasemissionen in Verbindung mit Elektromobilität zu quantifizieren.

In den nachfolgenden Abschnitten finden sich Policy Briefs zu diesen Themen:

- Elektromobilitätsszenarien und Fahrzeugbestand für Österreich
- Elektromobilitätsszenarien für Deutschland und Auswirkungen von Elektromobilität auf das deutsche Stromsystem
- Simulation der Auswirkungen von Elektromobilität auf das Stromsystem für Österreich und Deutschland 2030
- Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz durch Integration von Elektrofahrzeugen
- Ökonomische Kosten und Nutzen von Elektromobilität
- Externe Kosten von Elektromobilität
- Präferenzen für alternativ betriebene Fahrzeuge in Polen

Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen sind den jeweiligen Policy Briefs zu entnehmen.

## 2. Elektromobilitätsszenarien und Fahrzeugbestand für Österreich

Günther Lichtblau, Sigrid Stix

*Umweltbundesamt Wien*

Das Umweltbundesamt hat im Rahmen des zweijährigen europäischen Projekts DEFINE – „Development of an Evaluation Framework for the Introduction of Electromobility“ – Szenarien für das Potential von Elektrofahrzeugen in Österreich entwickelt. Aufbauend auf empirischen Daten zum aktuellen Verkehrsverhalten und einer Conjoint-Analyse zur Simulierung der Kaufentscheidung haben ExpertInnen des Umweltbundesamtes Bestandsberechnungen abgeleitet und Umwelteffekte ausgewiesen.

### **Szenarien für Österreich – 1 Mio. Elektrofahrzeuge im Jahr 2030**

Das business-as-usual Szenario (BAU) zeigt, dass bis 2030 unter aktuellen Rahmenbedingungen ein Bestand an ca. 886.000 Elektrofahrzeuge (rein elektrische und Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge) in Österreich möglich ist. Werden zusätzliche Maßnahmen zur Forcierung von Elektromobilität berücksichtigt, kann der Bestand an Elektrofahrzeugen in der Flotte auf ca. 1 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2030 ansteigen. Für diese Entwicklung im Elektromobilität+ Szenario (EM+) sind Maßnahmen wie etwa ambitionierte Zielwerte für die CO<sub>2</sub>-Regulierung auf europäischer Ebene, eine Anpassung der NOVA, erhöhte Kraftstoffsteuern und ein verstärkter Ausbau der Ladestelleninfrastruktur in Österreich notwendig. Die Einsparungen an CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen beim BAU Szenario ca. 1 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen, im EM+ Szenario steigt das Einsparungspotenzial auf etwa 1,2 Mio. Tonnen. Die Analyse ergab auch, dass insbesondere Frauen im städtischen Umfeld und Carsharing-NutzerInnen die größte Affinität für diese Technologie zeigen.

### **Einleitung**

Der Verkehrssektor ist mit 21,7 Mio. Tonnen (2012) einer der Hauptverursacher der Treibhausgas-Emissionen (THG) in Österreich. Im Zeitraum 1990–2012 sind die THG dieses Sektors um 54 % angestiegen. Diese Entwicklung steht in deutlichem Gegensatz zu relevanten umweltpolitischen Zielsetzungen, insbesondere die THG in Österreich bis 2020 um 16 % zu reduzieren (bezogen auf 2005). Bis 2030 hat zudem die Europäische Kommission eine Reduktion von 40% der THG-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 vorgegeben.

Im Verkehrssektor kann neben dem Ausbau des öffentlichen Verkehrs, der forcierte Einsatz von alternativen Antriebstechnologien bei Pkw dem Anstieg der THG-Emissionen entgegenwirken.

Elektrofahrzeuge gelten hierbei als nachhaltige Zukunftstechnologie mit dem größten Potenzial. Die Verwendung von Strom aus Erneuerbaren Energieträgern führt im Vergleich zu konventionell betriebenen Fahrzeugen zu geringeren Umweltbelastungen. Elektrofahrzeuge sind effizienter und benötigen dadurch weniger Energie, verursachen weniger Luftschadstoffe und auch weniger Lärm. Allerdings ist das Angebot von marktfähigen Elektrofahrzeugen derzeit gering, u.a. bedingt durch Batterien mit geringer Speicherdichte bzw. hohe Preise.

Von besonderem Interesse sind daher mögliche Entwicklungspfade des Fahrzeugbestands, die Akzeptanz der NutzerInnen und die zukünftige technologische Entwicklung.

### **Analyse in zwei Szenarien**

Im Rahmen von DEFINE hat das Umweltbundesamt eine Analyse des Fahrzeugbestandes und dessen THG-Emissionsreduktionspotentiale für Österreich durchgeführt. Entwickelt wurden zwei Szenarien: ein business-as-usual Szenario (BAU) und ein Szenario (Elektromobilität+, EM+), dem veränderte Rahmenbedingungen zur Erhöhung des Anteils von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen sowie teilelektrifizierten Fahrzeugen (PHEV) zu Grunde gelegt wurde. Besonderes Augenmerk wurde auf die

Auswahl der Maßnahmen im EM+ Szenario gelegt, da die Maßnahmen - unter Einbeziehung der politischen Plausibilität für Deutschland – gemeinsam mit dem Öko-Institut gewählt wurden.

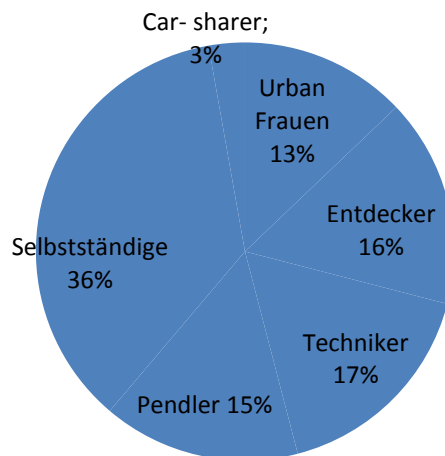
### Datenbasis

Aufbauend auf empirischen Daten zum aktuellen Verkehrsverhalten und einer Conjoint-Analyse zur Simulierung der Kaufentscheidung haben ExpertInnen des Umweltbundesamtes Bestandsberechnungen abgeleitet. Als Basis dienten u.a. Erhebungsdaten über die Fahrzeugakzeptanz bei Neuwagenkäuferinnen, die durch ein diskretes Entscheidungsexperiment repräsentativ für Österreich erhoben wurden (Umfrage GfK 2013). Die Ergebnisse wurden in das Transport-, Emissions- und Energie Modell (TEEM) des Umweltbundesamtes eingespielt, das auf Daten der österreichischen Luftschadstoffinventur (OLI) aufbaut. Zusätzlich wurde eine Clusteranalyse durchgeführt, um die spezifische Affinität unterschiedlicher NutzerInnen abzuleiten.

### NutzerInnengruppen

Die Auswertung der Clusteranalyse zeigt sechs unterschiedliche Gruppen: urbane Frauen, EntdeckerInnen, Techniker, Pendler, Selbstständige und Car-Sharing-Nutzer (siehe Abbildung 1). Die größte Gruppe sind die Selbstständigen (36 %), die kleinste Gruppe sind die Car-sharing-NutzerInnen (3 %). Die potenziellen KäuferInnen eines Elektrofahrzeugs sind weiblich, leben im urbanen Raum oder sind bereits NutzerInnen von Car-Sharing-Angeboten. Die höchste Affinität zum Plug-In Fahrzeuge (PHEV) hat die Gruppe der Techniker. Hier befinden sich zu einem Großteil Männer mit einem hohen Bildungsabschluss und einer hohen Anzahl an gefahrenen Jahreskilometern (15-20.000km). Darüber hinaus beziehen etwa 15% in dieser Gruppe das kleine Pendlerpauschal.

**Abbildung 1: Identifizierte NutzerInnengruppen**



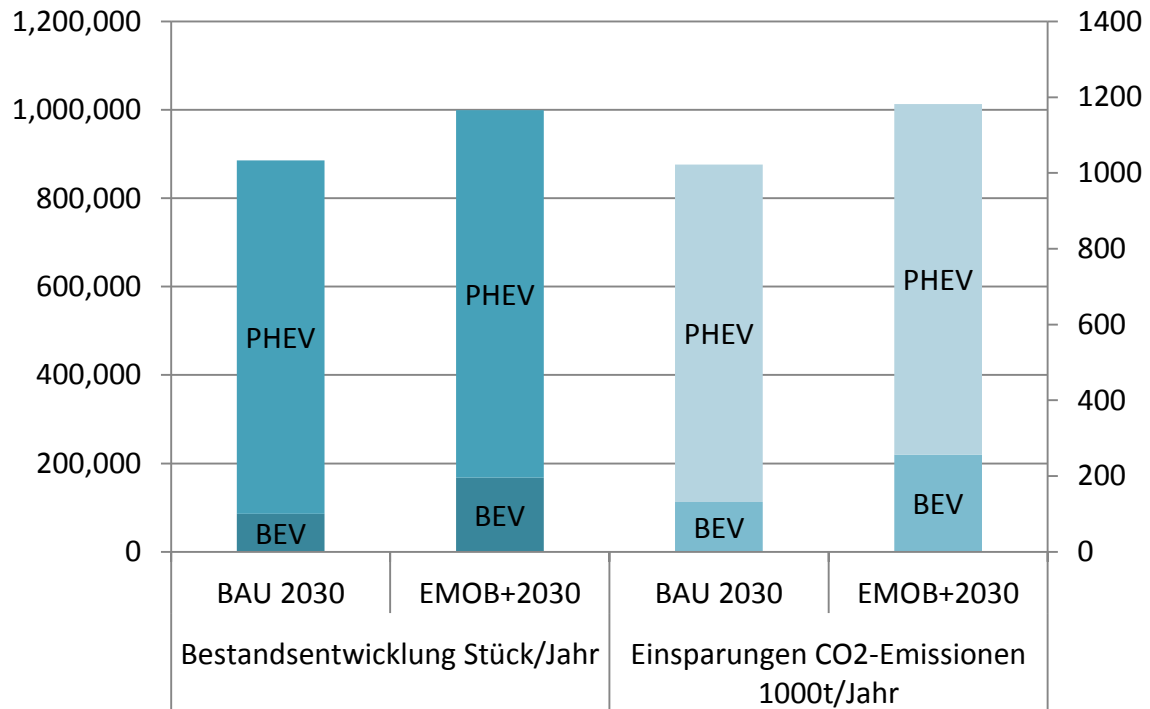
### Bestandsentwicklungen

Aktuell sind 3.038 elektrische PKW auf Österreichs Straßen unterwegs (Stand: September 2014). Im BAU Szenario, in dem alle bereits bestehenden Maßnahmen abgebildet sind, werden im Jahr 2030 insgesamt etwa 886.000 elektrische Pkw und Plug-In-Hybridfahrzeuge erwartet. Werden hingegen alle Maßnahmen entsprechend der Annahmen im EM+ Szenario implementiert, so wächst der Bestand im Jahr 2030 auf etwa 1 Million Elektrofahrzeuge an. (siehe Abbildung 2, linke Seite).

### Emissionseffekte THG und Luftschadstoffe

Im BAU Szenario betragen die Einsparungen an direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2030 dadurch etwa 1 Million Tonnen. Im EM+ Szenario ergeben sich durch die zusätzlichen Maßnahmen, Einsparungen der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Höhe von etwa 1,2 Mio. Tonnen, dies sind um 16 Prozent mehr an CO<sub>2</sub>-Einsparungen gegenüber dem BAU Szenario. (siehe Abbildung 2, rechte Seite ). Hinsichtlich der NO<sub>x</sub>-Emissionen werden für die Szenarien im Jahr 2030 folgende Reduktionspotentiale erwartet: im BAU Szenario 127 Tonnen und EM+ Szenario: 143 Tonnen.

**Abbildung 2: Bestandsentwicklungen und Einsparungen an CO<sub>2</sub>-Emissionen in den zwei Szenarien**



### Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Elektrofahrzeuge sind derzeit technologisch die aussichtsreichste Option, Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßenverkehr nachhaltig zu reduzieren und eine kohlendioxid-freie individuelle Mobilität zu erreichen. Dieses Potenzial kann nur dann Realität werden, wenn der Strom aus Erneuerbarer Energie gewonnen wird. Darüber hinaus birgt diese Technologie ein hohes Potenzial, Luftschadstoffemissionen und Lärm zu reduzieren. Insgesamt kann über Regulierungsmaßnahmen und Preissignale Angebot und Einsatz dieser effizienten Technologie forciert werden.

Maßnahmen können insbesondere dann wirksam und kosteneffizient umgesetzt werden, wenn die Affinität der NutzerInnengruppen für die Elektrofahrzeuge bei der Ausgestaltung berücksichtigt wird: Kurzfristig implementierbare Maßnahmen wie z.B. Kaufpreisförderungen, subventionierte Leasingangebote, Car-Sharing Angebote mit Elektrofahrzeugen, wirken dann am besten, wenn diese primär auf urbane Frauen und Car-sharing NutzerInnen gerichtet werden.

### 3. Elektromobilitätsszenarien für Deutschland und ihre Auswirkungen auf das deutsche Stromsystem bis 2030

**Clemens Gerbaulet, Wolf-Peter Schill**

*DIW Berlin*

**Peter Kasten**

*Öko-Institut*

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen künftiger Elektrofahrzeugflotten hängen stark vom angenommenen Kraftwerkspark und den Ladestrategien der Fahrzeuge ab. Unsere Analysen zeigen, dass ein zusätzlicher Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten erforderlich ist, um die Emissionsreduktionspotenziale von Elektrofahrzeugen vollständig zu heben. Ohne zusätzliche erneuerbare Energien könnte die Einführung der Elektromobilität – unabhängig von der Ladestrategie – zu erhöhten CO<sub>2</sub>-Emissionen führen.

Wir entwickeln zwei Marktszenarien für Elektromobilität in Deutschland bis zum Jahr 2030: Ein Business-as-usual Szenario (BAU) und ein Elektromobilität+ Szenario (EM<sup>+</sup>), das Politikmaßnahmen zur Markteinführung von Elektrofahrzeugen enthält (ein Feebate-System, eine angepasste Kraftstoffbesteuerung und ambitioniertere Emissionsstandards für Neufahrzeuge). Plug-in-Hybridfahrzeuge und Range-Extender-Fahrzeuge machen den Großteil der Elektrofahrzeuge in beiden Szenarien aus (insgesamt rund fünf Mio. Elektrofahrzeuge im EM<sup>+</sup> Szenario für 2030). Wir untersuchen die Auswirkungen der Integration dieser Fahrzeugflotten in das deutsche Stromsystem mit einem numerischen Kraftwerkseinsatzmodell. Der Energieverbrauch der modellierten Elektrofahrzeugflotten ist verglichen mit dem gesamten Stromverbrauch gering; die stündlichen Ladeleistungen können dagegen sehr hoch werden. Bei einer nutzergetriebenen Ladestrategie werden die Fahrzeuge überwiegend tagsüber und in den Abendstunden geladen, mit entsprechenden Auswirkungen auf die Höchstlast des Stromsystems. Im Gegensatz dazu verschiebt eine kostengetriebene Ladestrategie die Aufladung größtenteils in die Nachtstunden. Demnach erhöht kostengetriebenes Laden die Auslastung von Stein- und Braunkohlekraftwerken deutlich, während im nutzergetriebenen Fall der zusätzliche Strom überwiegend aus Erdgas- und Steinkohlekraftwerken stammt. Insgesamt sind die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der zusätzlichen Stromerzeugung in den meisten Szenarien deutlich höher als die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen des gesamten Strommixes, da die stärkere Integration erneuerbarer Energien überkompensiert wird durch eine vermehrte Kohleverstromung. Nur wenn die Einführung der Elektromobilität mit einem entsprechenden zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten verknüpft wird (Szenario RE<sup>+</sup>) erreichen Elektrofahrzeuge eine weitgehende CO<sub>2</sub>-Neutralität. Weitergehende Analysen der kombinierten CO<sub>2</sub>-Bilanz des Strom- und Verkehrssektors zeigen, dass die zusätzlichen Emissionen im Strombereich die Emissionsminderungen im Verkehrsbereich im BAU Szenario überkompensieren; im EM<sup>+</sup> Szenario kehrt sich dieser Effekt um.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse leiten wir folgende politikrelevante Schlussfolgerungen ab: Erstens sollte den Entscheidungsträgern bewusst sein, dass Elektrofahrzeuge den Stromverbrauch und damit auch die Auslastung konventioneller Kraftwerke erhöhen können. Wenn die Einführung der Elektromobilität politisch mit der Nutzung erneuerbarer Energien und Klimaneutralität verknüpft wird, so muss sichergestellt werden, dass ein entsprechender – über bestehende Ausbauszenarien hinausgehender – zusätzlicher Ausbau der erneuerbaren Energien erfolgt. Zweitens könnte es in Hinblick auf kritische Spitzenlastsituationen erforderlich werden, eine rein nutzergetriebene Ladestrategie künftig regulatorisch einzuschränken. Drittens kann kosten- bzw. markt-getriebenes Aufladen nur dann zu emissionsoptimalen Ergebnissen führen, wenn die Emissionsexternalitäten im Strompreis korrekt wiedergespiegelt sind. Nicht zuletzt weisen wir darauf hin, dass die Einführung der Elektromobilität

nicht nur in Hinblick auf mögliche CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen bewertet werden sollte; vielmehr können Elektrofahrzeuge weitere Vorteile mit sich bringen, beispielsweise geringere Emissionen von anderen Luftschadstoffen und Lärm sowie eine verringerte Abhängigkeit von Erdöl im Verkehrsbereich.

## Einleitung

Im Rahmen des Projekts DEFINE haben das Öko-Institut und das DIW Berlin gemeinsam mögliche künftige Interaktionen des Einstiegs in die Elektromobilität mit dem deutschen Stromsystem untersucht. Wir waren dabei besonders interessiert an den Auswirkungen künftiger Elektrofahrzeugflotten auf den Kraftwerkseinsatz, die Integration fluktuierender erneuerbarer Energien und die daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionsänderungen, jeweils unter verschiedenen Annahmen zur Ladestrategie der Elektrofahrzeuge.

Zunächst hat das Öko-Institut zwei Marktszenarien für Elektromobilität in Deutschland bis 2030 entwickelt: ein Business-as-usual Szenario (BAU) und ein Elektromobilität+ Szenario (EM<sup>+</sup>). Auf Basis empirischer Mobilitätsdaten und einer Conjoint-Analyse wurden mögliche Entwicklungen der Neuzulassungen und des Bestands von Elektrofahrzeugen abgeleitet. Für die Jahre 2020 und 2030 wurden je 28 verschiedene Profile des stündlichen Energieverbrauchs und der maximal verfügbaren Ladeleistung generiert. Diese dienen als Inputparameter für eine numerische Modellanalyse des DIW Berlin. Auf Basis eines gemischt-ganzzahligen Kraftwerkseinsatzmodells des DIW Berlin wurde die Integration dieser Elektrofahrzeugflotten in das deutsche Stromsystem für verschiedene Szenarien analysiert, insbesondere in Hinblick auf verschiedene Ladestrategien. Die errechneten CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden wiederum an das Öko-Institut übergeben. Sie dienen als Inputparameter für das TEMPS-Modell, mit dem das Öko-Institut den sektorenübergreifenden Netto-Emissionseffekt bestimmt hat. Dabei wurde auch der Emissionseffekt des Ersatzes konventioneller Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge berücksichtigt.

## Zwei Elektromobilitätsszenarien

Für den Zeitraum bis 2030 wurden für Deutschland zwei Elektromobilitätsszenarien entwickelt. Im BAU Szenario werden die heute feststehenden politischen Rahmenbedingungen fortgeschrieben. Im Gegensatz dazu umfasst das EM<sup>+</sup> Szenario Politikmaßnahmen, die der Förderung von Elektromobilität dienen, wie beispielsweise eine höhere Kraftstoffbesteuerung, ambitioniertere Emissionsstandards für Neufahrzeuge und die Einführung eines Feebate-Systems (Bonus-Malus-System). Für die Abschätzung der Fahrleistung, aber auch um die Restriktionen für die Nutzung elektrischer Fahrzeuge abzubilden, wurden repräsentative Mobilitätsdaten für Deutschland verwendet. Die Kaufentscheidung zwischen Pkw mit verschiedenen Antriebstechnologien wurde mit Hilfe einer Conjoint-Analyse simuliert, für die 1.500 potenzielle Neuwagenkäufer befragt wurden.

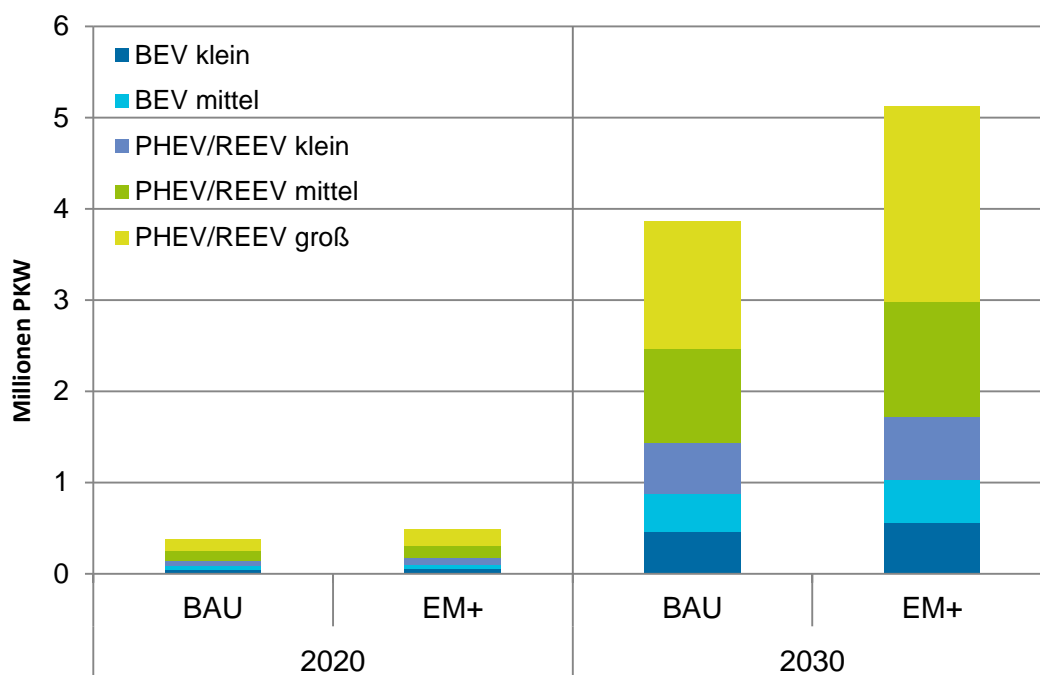
Neben den Anschaffungskosten sind Ladeinfrastrukturanforderungen und lange Fahrten, die über die Reichweite batterieelektrischer Pkw hinausgehen, die hauptsächlichen Restriktionen für die Nutzung und den Kauf elektrischer Pkw. Ungefähr 50% der Pkw-Besitzer in Kernstädten besitzen keine Parkmöglichkeit auf dem eigenen Grundstück und sind damit bei der Nutzung eines elektrischen Pkw vollständig von einer (halb-)öffentlichen Ladeinfrastruktur abhängig. Der Anteil der Pkw-Besitzer ohne Stellplatz auf dem eigenen Grundstück sinkt in Vororten und im ländlichen Raum auf 30%. Lange Fahrten stellen ein starkes Hemmnis für batterieelektrische Pkw dar, und die Wahrscheinlichkeit, dass eine Fahrt über der Reichweite elektrischer Pkw mehr als vier Mal im Jahr angetreten wird, liegt bei über 70%.

Mit den gesetzten Rahmenbedingungen zeigt sich in der Conjoint-Analyse eine hohe Zustimmung und Akzeptanz für Elektromobilität. Das Marktpotenzial elektrischer Pkw liegt bei ca. 50% im BAU Szenario und bei ca. 60% im EM<sup>+</sup> Szenario. Die Akzeptanz von Plug-in Hybrid Fahrzeugen ist dabei höher als

die für rein batterieelektrische Pkw. Für die Ableitung des Marktanteils elektrischer Pkw wurde zudem eine Marktdiffusion mit berücksichtigt, um Effekten wie beispielsweise eines notwendigen Aufbaus der Produktionskapazitäten und einer mangelnden Modellvielfalt Rechnung zu tragen.

In den Szenarien liegt der Marktanteil elektrischer Pkw bei den Neuzulassungen im Jahr 2020 bei 5-6%; dieser steigt bis zum Jahr 2030 auf 20–25%. Im Vergleich zu batterieelektrischen Pkw (BEV) liegen höhere Marktanteile für Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV) und Range-Extender-Fahrzeuge (REEV) vor. Die Entwicklung der Neuzulassungen wurde in DEFINE für die Bestimmung des Pkw-Bestandes bis 2030 verwendet. Im Jahr 2020 besteht die Flotte elektrischer Fahrzeuge in den Szenarien aus rund 400.000 (BAU) bzw. 500.000 (EM<sup>+</sup>) Pkw. Die Anzahl der elektrischen Pkw steigt bis 2030 im BAU Szenario auf rund 3,9 Mio. Pkw; im EM<sup>+</sup> Szenario befinden sich knapp 5,1 Mio. elektrische Pkw im Bestand, was 13% des gesamten Pkw-Bestands ausmacht (Abbildung 3).

Abbildung 3: Bestand elektrischer Pkw im BAU- und im EM<sup>+</sup> Szenario



### Auswirkungen von Elektrofahrzeugen auf das deutsche Stromsystem

Für die Analyse wurde ein numerisches Kostenminimierungsmodell genutzt, mit dem der Kraftwerkseinsatz und die Aufladung von Elektrofahrzeugen gleichzeitig optimiert werden. Das Modell ermittelt den kostenminimierenden Kraftwerkseinsatz unter Berücksichtigung des thermischen Kraftwerksparks, der Erzeugungsmöglichkeiten fluktuierender erneuerbarer Energien, der verfügbaren Pumpspeicher und den jeweils mit dem Netz verbundenen Elektrofahrzeugen. Interaktionen mit Nachbarländern werden in dieser Analyse nicht betrachtet. Das Modell hat eine stündliche Auflösung und wird für ein komplettes Jahr gelöst. Es berücksichtigt realistische inter-temporale Restriktionen thermischer Kraftwerke, beispielsweise Mindestlastbedingungen, Mindeststillstandszeiten und Anfahrkosten. Das Modell erfordert eine Reihe exogener Inputparameter, darunter thermische und erneuerbare Erzeugungskapazitäten, fluktuierende Verfügbarkeiten von Windkraft und Photovoltaik, Erzeugungskosten und andere technisch-ökonomische Parameter sowie Nachfragedaten. Wir stützen uns dabei überwiegend auf semi-offizielle Szenarioparameter sowie auf die Datenbank des DIW Berlin.

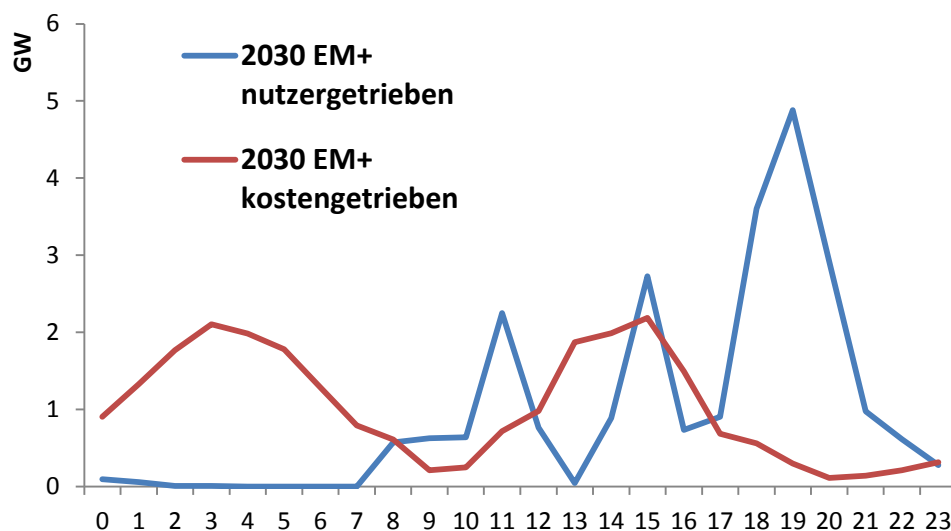
Wir wenden das Kraftwerkseinsatzmodell auf die BAU- und EM<sup>+</sup>-Szenarien der Jahre 2020 und 2030 an. In Hinblick auf installierte Stromerzeugungsleistungen unterschiedlicher Technologien stützen wir uns auf den deutschen Netzentwicklungsplan, der den Zielsetzungen der deutschen Bundesregierung



entsprechend einen deutlichen Ausbau erneuerbarer Energien enthält. In sechs zusätzlichen Modellläufen simulieren wir aufbauend auf dem 2030 EM+ Szenario die Effekte eines zusätzlichen Ausbaus erneuerbarer Energien (RE<sup>+</sup>). Diese zusätzlichen Kapazitäten sind so gewählt, dass sie die Stromnachfrage der Elektrofahrzeugflotte genau abdecken. Dabei wird angenommen, dass der zusätzliche Strom entweder vollständig aus zusätzlichen Windkraftanlagen an Land stammt, vollständig aus zusätzlichen PV-Anlagen, oder je zur Hälfte aus zusätzlichen Windkraft- und PV-Anlagen. In Hinblick auf die Elektromobilität werden die oben genannten 28 Fahrzeugprofile genutzt, die vom Öko-Institut auf Basis repräsentativer Mobilitätsdaten abgeleitet wurden. Die stündlichen Profile des Energieverbrauchs und der verfügbaren Ladeleistung der Elektrofahrzeuge sind wesentliche Inputparameter für die Modellierung. Wir unterscheiden zwei extreme Aufladestrategien: vollständig nutzergetrieben oder vollständig kostengetrieben. Im nutzergetriebenen Lademodus werden Elektrofahrzeuge so schnell wie möglich vollständig aufgeladen, sobald sie mit dem Stromnetz verbunden sind. Im kostengetriebenen Modus kann die Aufladung dagegen innerhalb der durch die Profile gesetzten Grenzen verschoben werden, wobei die Kosten der Aufladung minimiert werden.

Die Modellergebnisse zeigen, dass der gesamte Energiebedarf der modellierten Elektrofahrzeugflotten im Vergleich zur gesamten Stromnachfrage gering ist. Im Jahr 2020 macht die Elektromobilität je nach Aufladestrategie nur ungefähr 0,1% bis 0,2% der gesamten Stromnachfrage aus. Bis zum Jahr 2030 wachsen diese Anteile auf ungefähr 1,3% (nutzergetrieben) bis 1,6% (kostengetrieben) an. Die stündlichen Ladeleistungen können jedoch sehr hoch werden, mit entsprechenden Konsequenzen für das Stromsystem. Die Ladeleistung variiert grundsätzlich erheblich zwischen einzelnen Stunden und unterscheidet sich zudem stark zwischen dem nutzergetriebenen und dem kostengetriebenen Lademodus. Die nutzergetriebene Aufladung erfolgt überwiegend tagsüber und in den Abendstunden (Abbildung 4). Dies kann zu einer deutlichen Steigerung der Spitzenlast des Stromsystems führen, was besorgniserregende Konsequenzen für die Systemsicherheit nach sich zieht. Im nutzergetriebenen Szenario des Jahres 2030 gibt es sowohl im BAU- als auch im EM+ Szenario mehrere Stunden, in denen die verfügbare Erzeugungsleistung vollständig erschöpft wird. Im Gegensatz dazu wird im kostengetriebenen Modus die abendliche Spitze des Aufladeprofiles in die Nacht verschoben, was zu einer deutlich geringeren Erhöhung der Spitzenlast des Systems führt. Das durchschnittliche Profil im kostengetriebenen Auflademodus ist insgesamt wesentlich gleichmäßiger als das im nutzergesteuerten Modus.

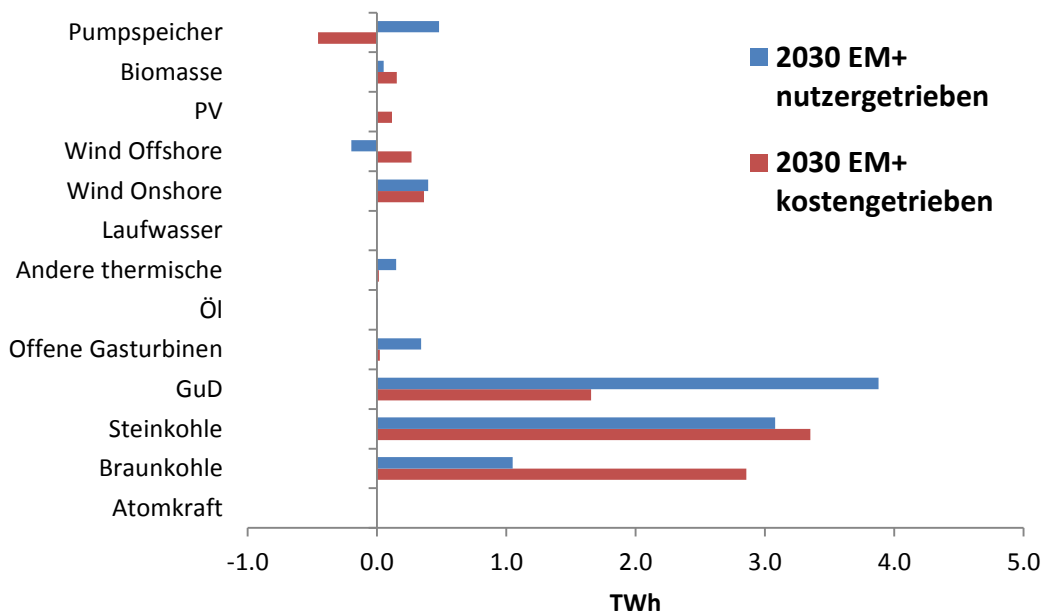
**Abbildung 4: Durchschnittliche Ladeleistung über 24 Stunden**



Die unterschiedlichen Aufladeprofile gehen mit entsprechenden Änderungen im Kraftwerkseinsatz einher. Im EM+ Szenario des Jahres 2030 erhöht sich bei einer kostengetriebenen Ladestrategie vor

allein die Auslastung von Stein- und Braunkohlekraftwerken stark gegenüber einem Szenario ohne Elektrofahrzeuge. Bei einer nutzergetriebenen Aufladung, die häufig in Stunden durchgeführt wird, in denen Braunkohlekraftwerke bereits voll ausgelastet sind, stammt die zusätzliche Stromerzeugung überwiegend aus erdgasbefeuerten Gas- und Dampfkraftwerken sowie in geringerem Umfang aus Stein- und Braunkohlekraftwerken (Abbildung 5).

**Abbildung 5: 2030 EM<sup>+</sup>: Änderungen im Kraftwerkseinsatz gegenüber einem Szenario ohne Elektrofahrzeuge**



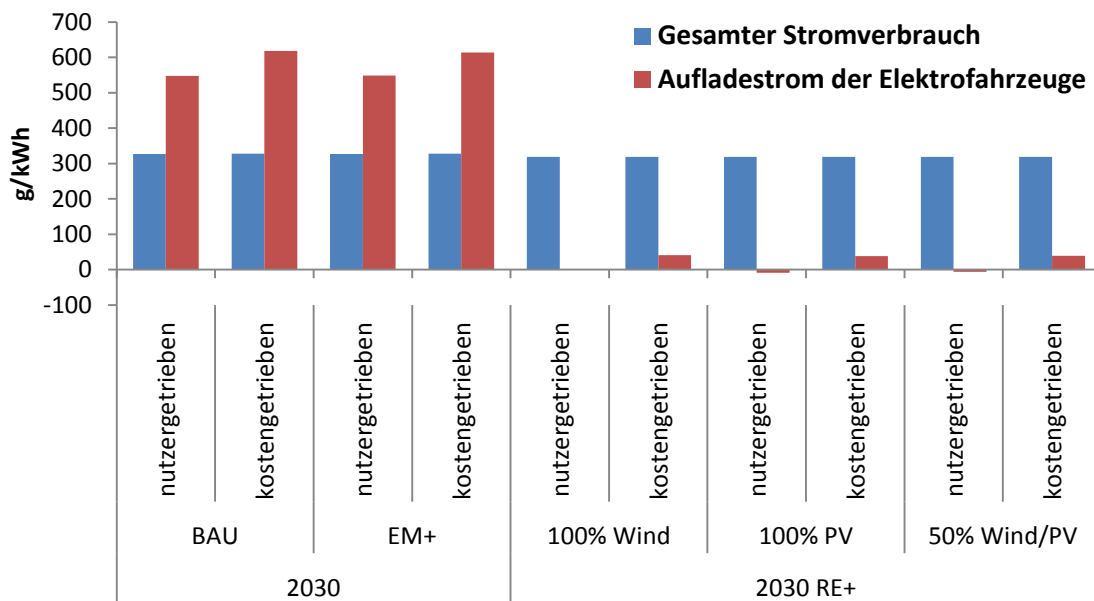
In zusätzlichen Modellläufen (RE<sup>+</sup>) verknüpfen wir die Einführung der Elektromobilität direkt mit einem zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten. Bei nutzergetriebener Aufladung führt dies im Vergleich zu einem Szenario ohne diese zusätzlichen Erzeugungskapazitäten und ohne Elektrofahrzeuge – wie zu erwarten – zu einer deutlichen Erhöhung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, aber auch zu einem gewissen Rückgang der Braunkohleverstromung und einer Zunahme der Stromerzeugung in Gaskraftwerken. Bei kostengetriebener Aufladung dagegen ermitteln wir einen gegenteiligen Effekt: hier steigt die Braunkohleverstromung an, während die Stromerzeugung aus Gaskraftwerken sinkt. Grund hierfür ist die zusätzliche nachfrageseitige Flexibilität der Elektrofahrzeugflotte.

Die temporäre Abregelung fluktuierender erneuerbarer Stromerzeuger ist im Rahmen der getroffenen Annahmen grundsätzlich in allen Szenarien gering. Die Modellergebnisse zeigen jedoch, dass das Potenzial der Elektromobilität zur Vermeidung der Abregelung erneuerbarer Energien bei kostengetriebener Aufladung deutlich höher ist als bei nutzergetriebener Aufladung. Im EM<sup>+</sup> Szenario des Jahres 2030 vermindert eine kostengetriebene Aufladung den Anteil der Abregelung erneuerbarer Energien von 0,65% im Fall ohne Elektrofahrzeuge auf 0,29%. Unter den RE<sup>+</sup>-Szenarien weist der reine PV-Zubau die geringsten Abregelungsniveaus auf, der reine Zubau von Offshore-Windkraft dagegen die höchsten. Demnach dürften die Einspeisemöglichkeiten der Photovoltaik insgesamt besser zu den Elektrofahrzeugen passen als die der Offshore-Windkraft.

Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der zusätzlichen Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen hängen sowohl vom zugrunde liegenden Kraftwerkspark als auch von der Ladestrategie ab. Elektrofahrzeuge können sowohl die Auslastung von emissionsintensiven Erzeugungstechnologien wie Braun- und Steinkohle als auch die Systemintegration fluktuierender erneuerbarer Energien verbessern. Während ersteres zu erhöhten CO<sub>2</sub>-Emissionen führt hat letzteres einen gegenteiligen Effekt. In den BAU- und EM<sup>+</sup>-Szenarien der Jahre 2020 und 2030 dominiert der zuerst genannte Effekt die Emissionsbilanz;

dies gilt insbesondere bei einer kostengetriebenen Ladestrategie. Die spezifischen Emissionen des Ladestroms sind daher – unabhängig vom Auflademodus – deutlich größer als die spezifischen Emissionen des gesamten Strommixes (Abbildung 6). Im Gegensatz dazu liegen die Emissionen bei einem gleichzeitigen zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien (RE+) deutlich darunter und werden in einigen Fällen sogar leicht negativ. Wir weisen darauf hin, dass derartige Effekte grundsätzlich stark von der Struktur des Kraftwerksparks und dem Grad der Abregelung erneuerbarer Energien abhängen. 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.

**Abbildung 6: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung in den Szenarien des Jahres 2030**

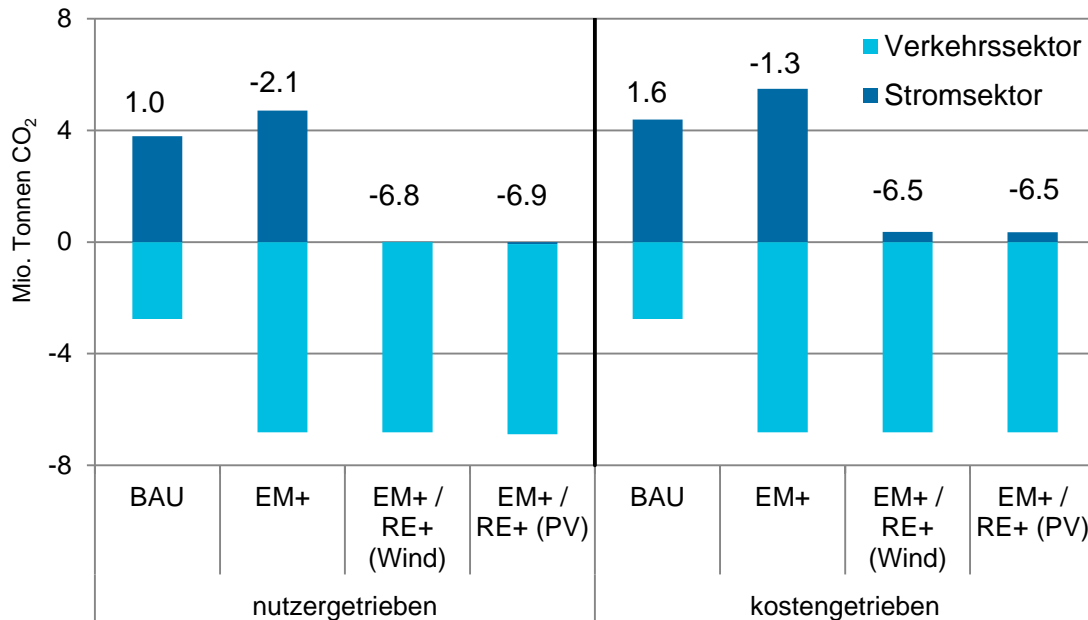


### Die Netto-CO<sub>2</sub>-Bilanz der Elektromobilität

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors reduzieren sich beim Ersatz von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen durch elektrisch angetriebene Pkw. Im Gegensatz dazu können die Emissionen im Stromsektor durch die erhöhte Stromnachfrage ansteigen (siehe oben). Im EM+ Szenario werden aufgrund der Annahme einer strikteren CO<sub>2</sub>-Regulierung im Vergleich zum BAU Szenario zudem niedrigere spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen bei verbrennungsmotorischen Pkw angenommen. Daher wurde eine Netto-CO<sub>2</sub>-Bilanz für die Emissionen aus Strom- und Verkehrssektor durchgeführt, um den vollständigen CO<sub>2</sub>-Effekt der Markteinführung der Elektromobilität mit abzubilden. Für das Jahr 2030 zeigt sich im BAU Szenario, dass die CO<sub>2</sub>-Reduktion im Transportsektor durch die Mehremissionen im Stromsektor überkompensiert wird. Insgesamt steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Szenario ohne Elektromobilität je nach Lademodus um 1,0 bzw. 1,6 Mio. Tonnen (Abbildung 7). Im EM+ Szenario wird dagegen eine negative CO<sub>2</sub>-Bilanz erreicht; die Emissionen reduzieren sich um 1,3 bzw. 2,1 Mio. Tonnen, wobei dieses Ergebnis aufgrund der niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen der verbrennungsmotorischen Pkw erreicht wird. In beiden Szenarien sind die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Stromnachfrage der elektrischen Pkw entstehen, im Jahr 2030 höher als die der verbrennungsmotorischen Pkw, da die Emissionsverbesserungen bei konventionellen Pkw größer sind als die im Kraftwerkspark. Die elektrischen Pkw werden in den Simulationsläufen mit zusätzlichen Kapazitäten an erneuerbarer Stromerzeugung (RE+) nahezu CO<sub>2</sub>-neutral, auch wenn die Emissionen des Stromsektors in die Bilanz mit einbezogen werden. Die Netto-CO<sub>2</sub>-Bilanz weist dann eine Verringerung von 6,9 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>

gegenüber einem Szenario ohne Elektromobilität auf. In den Szenarien mit zusätzlichen erneuerbaren Energien wird das CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial daher vollständig ausgeschöpft.

**Abbildung 7: Netto-CO<sub>2</sub>-Bilanz von Verkehrs- und Stromsektor für 2030 (in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>, Vergleich zu Szenario ohne Elektromobilität und ohne zusätzliche erneuerbare Energien)**



### Politische Schlussfolgerungen

Auf Basis der Modellergebnisse leiten wir mehrere politische Schlussfolgerungen ab. Erstens müssen sich die Entscheidungsträger zumindest auf absehbare Zeit keine Sorgen um den Gesamtstromverbrauch künftiger Elektrofahrzeugflotten machen, über die möglichen Leistungsspitzen der Fahrzeugaufladung hingegen durchaus. In Hinblick auf Ladespitzen und die Systemsicherheit ist eine kostengetriebene Aufladung einer nutzergetriebenen Aufladung klar vorzuziehen. Aufgrund begrenzter gesicherter Erzeugungskapazitäten könnte es erforderlich werden, die rein nutzergetriebene Aufladung künftig regulatorisch einzuschränken, spätestens wenn die Fahrzeugflotten so groß werden wie hier in den Szenarien des Jahres 2030 unterstellt.

Zweitens sollten die politischen Entscheidungsträger sich bewusst sein, dass eine kostengetriebene, d.h. optimierte Aufladung nicht nur die Systemintegration erneuerbarer Energien verbessern kann, sondern auch die Auslastung von Stein- und Braunkohlekraftwerken. Wird die Einführung der Elektromobilität politisch mit der Nutzung erneuerbarer Energien verknüpft, wie von der deutschen Bundesregierung mehrfach geäußert, so muss sichergestellt werden, dass ein entsprechender – über bestehende Ausbauszenarien hinausgehender – zusätzlicher Ausbau erneuerbarer Energien erfolgt. In Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen ist ein derartiger zusätzlicher Ausbau erneuerbarer Energien besonders wichtig solange noch erhebliche – und zunehmend unterausgelastete – Stromerzeugungskapazitäten emissionsintensiver Technologien am Netz sind. Dabei spielt es aus einer Systemperspektive keine Rolle, ob die zusätzliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien komplett durch eine passgenaue Aufladung von Elektrofahrzeugen in den jeweiligen Stunden verbraucht wird, oder ob sie die sonstige Stromnachfrage deckt.

Drittens kann eine kostengetriebene Aufladung, die einer marktgetriebenen bzw. einer gewinnmaximierenden Aufladung in einem perfekt wettbewerblichen Markt entspricht, nur dann zu emissionsoptimalen Ergebnissen führen, wenn die Emissionsexternalitäten adäquat eingepreist sind. Andernfalls kann eine optimierte Aufladung zu überdurchschnittlich hohen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen führen,

und sogar zu höheren Emissionen als eine nutzergetriebene Aufladung. Demnach sollte die Politik sicherstellen, dass CO<sub>2</sub>-Emissionen hinreichend bepreist werden. Andernfalls müsste eine andere, Emissions-orientierte Ladestrategie verfolgt werden, die theoretisch denkbar wäre, deren Implementierung in der Praxis aber äußerst unwahrscheinlich ist.

Nicht zuletzt wollen wir darauf hinweisen dass die Einführung der Elektromobilität nicht nur in Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet werden sollte. Elektrofahrzeuge können weitere Vorteile mit sich bringen, beispielsweise geringere Emissionen von anderen Luftschadstoffen und Lärm sowie eine verminderte Abhängigkeit von Erdöl im Verkehrsbereich. Insbesondere erlauben Elektrofahrzeuge die Nutzung heimischer erneuerbarer Energien im Verkehrssektor, ohne dass auf Biokraftstoffe zurückgegriffen werden muss.

### Quellen

Schill, W.-P., Gerbaulet, C. (2014): Project Report: Power System Impacts of Electric Vehicles in Germany. Project: Development of an Evaluation Framework for the Introduction of Electromobility. 6 September 2014.

Kasten, P., Hacker, F. (2014): DEFINE: Development of an Evaluation Framework for the Introduction of Electromobility. Two electromobility scenarios for Germany: Market development and their impact on CO<sub>2</sub> emissions of passenger cars in DEFINE. Deliverables: 4.1–4.5 und 5.1, November 2014.

## 4. Simulation der Auswirkungen von Elektromobilität auf das Stromsystem für Österreich und Deutschland 2030

Gerhard Totschnig, Markus Litzlbauer

*Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, TU Wien*

Ein hochauflösendes Strom- und Wärmesystem-Simulationsmodell von Österreich und Deutschland (HiREPS) wurde eingesetzt, um die Auswirkungen und Kosten von marktgesteuertem mit ungesteuertem Laden zu vergleichen. Weiters wurde untersucht, wie sich das Ladeverhalten der Benutzer von Elektroautos auf den Nutzen von marktgesteuertem Laden auswirkt.

### Einleitung

Für diese Analyse wird das hochauflösende Simulationsmodell HiREPS der TU Wien verwendet. Das Modell optimiert den Kraftwerkseinsatz und die Investitionen bei der Stromerzeugung, den Ausbau der Pumpspeicher, simuliert und optimiert die Kopplung von Strom- und Wärmesystem durch KWK-Anlagen in der Fernwärme und durch P2H (Power to Heat = Nutzung von Strom im Wärmesektor) in allen Sektoren der Raumwärme- und Warmwassererzeugung. Es simuliert den möglichen Einsatz von industriellem Lastmanagement, von alternativen Speicheroptionen wie adiabaten Druckluftspeichern und Power to Gas, und simuliert das Laden von Elektroautos für verschiedene Ladestrategien.

Die Simulation des Ladens von Elektroautos wird für 100 repräsentative Fahrprofile und 6 Elektroauto-Typen basierend auf Daten von Mobilitätshebungen in Österreich und Deutschland durchgeführt.

### Szenario-Annahmen 2030

Es wurden 6 Szenarien für 2030 untersucht. Einerseits marktgesteuertes (MG) und ungesteuertes (UG) Laden, jeweils unter der Annahme von häufigem (HL) oder seltenem Laden (SL). Beim häufigen Laden wird angenommen, dass die NutzerInnen von Elektroautos die PKW immer an eine Ladesäule anschließen, wenn sich bei einem Stopp eine Lademöglichkeit bietet. Wenn die NutzerInnen von Elektroautos die PKWs nur dann an eine Ladesäule anschließen, wenn die Batterie so leer ist, dass sie laden müssen, um die nächsten Fahrten möglichst viel mit Strom fahren zu können, wird dieses Nutzerverhalten hier mit *seltenem* Laden bezeichnet. Bei den 2 Szenarien mit marktgesteuertem Laden (häufiges und seltenes Laden) wurde für die reinen Batterieautos je ein Szenario mit und ohne Vehicle-to-Grid (V2G) simuliert.

In den hier gezeigten HiREPS-Simulationen werden Österreich und Deutschland gemeinsam betrachtet. Die Brennstoffkosten und Kraftwerkskapazitäten für Deutschland sind dem Szenario B des Szenariorahmens für den Netzentwicklungsplan Strom 2013 entnommen[1]. Für Österreich wurde eine Fortschreibung der thermischen Kapazitäten von 2012 angenommen, eine installierte PV-Kapazität, die dem Zweifachen des 2020-Ziels im Ökostromgesetz 2012 entspricht und ein Windenergie-Ausbau auf 50 % des im Projekt AuWiPot simulierten realisierbaren Potentials 2030 [2]. Basierend auf dem Primes-Referenzszenario 2011 wurde eine Zunahme des Strombedarfes um 10 % bezüglich 2010 angenommen[3].

Im hier analysierten EM+2030 Szenario sind im Jahr 2030 6,4 Mio. PKW (13 % aller PKW) Elektrofahrzeuge: 20 % reine Batteriefahrzeuge und 80 % Plugin-Hybride. Für die Plugin-Elektromobile wurde vereinfachend angenommen, dass diese rein mit Strom fahren bis die Batterie leer ist und dann mit Diesel oder Benzin. Weiters wird angenommen, dass alle E-Autos in der Nacht Zuhause laden können, 15 % aller Autos am Arbeitsplatz eine Lademöglichkeit haben und bei 30 % der Stopps im öffentlichen Raum eine Lademöglichkeit verfügbar ist. Die Lebensdauer moderner Batterien für Elektromobilität ist

momentan mit circa 3000 – 5000 Vollzyklen bei 100 % Entladetiefe der nominellen Kapazität oder durch das Erreichen eines Alters von 12 kalendarischen Jahren begrenzt. Die Nützung der PKW-Batterien als Speicher für das Stromnetz (Vehicle to Grid = V2G) wurde nur dann als möglich angesehen, wenn 3000 Vollladezyklen durch den normalen Fahrbetrieb in den 12 Jahren nicht ausgeschöpft werden. Mit diesem Kriterium erlauben die simulierten Fahrprofile nur bei reinen Batterie-PWK einen V2G-Betrieb (siehe Abbildung 10).

Damit es beim gesteuerten Laden zu keinen Verletzungen der Netzrestriktionen im Niederspannungsnetz kommt, wurden bei den Szenarien das Maximum der Summenleistung je Haushalt (elektrische Lasten der Haushaltsgeräte sowie von Elektrofahrzeugen und Power-to-Heat-Anlagen) schon im Vorhinein im HiREPS-Modell mit 3 kW begrenzt.

**Tabelle 1: Szenario-Annahmen 2030**

GW Installierte		
Leistung 2030	AT	DE
Wind-Land	4.6	61.2
Wind-OffSh		21.9
PV	2.4	64.1
GuD	5.1	38.6
Steinkohle	1.2	21.9
Braunkohle		13.5
Preise 2030		
Kohle	Euro/MWh	10.31
Braunkohle	Euro/MWh	1.50
Erdgas	Euro/MWh	26.70
CO2 Preis	Euro/tCO2	39.60

**Tabelle 2: Fahrzeugbestand in den Szenarien**

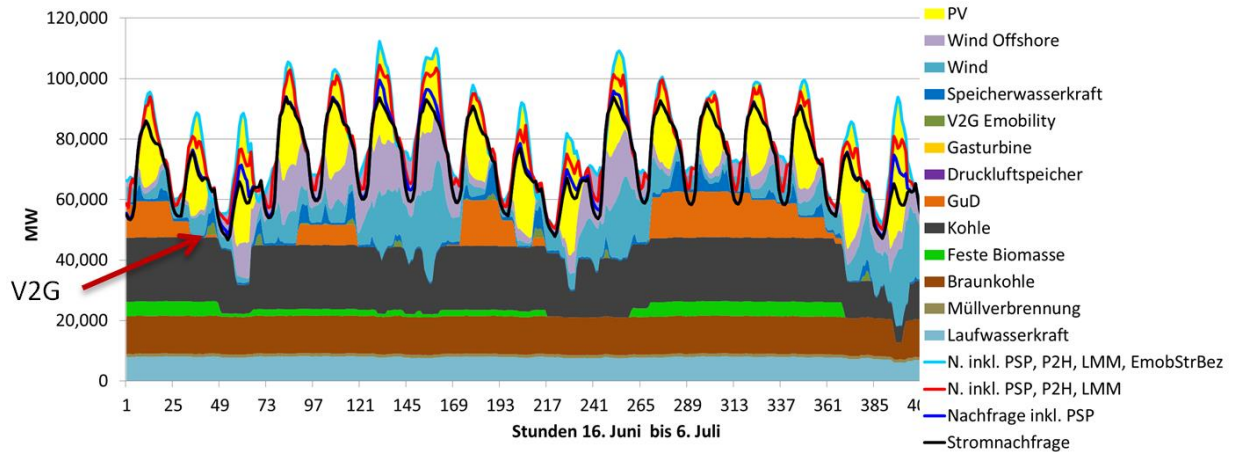
EMOB+ Szenario: AT+DE		2020	2030
small	BEV-small	59,695	634,340
	PHEV-small	96,317	979,269
mid-size	BEV-medium	53,686	547,301
	PHEV-medium	161,616	1,580,138
large	BEV-large	1,677	65,625
	PHEV-large	213,638	2,563,584
Total EV		586,629	6,370,257
Alle Autos		47,222,830	47,986,415
	%	1%	13%

## Simulation

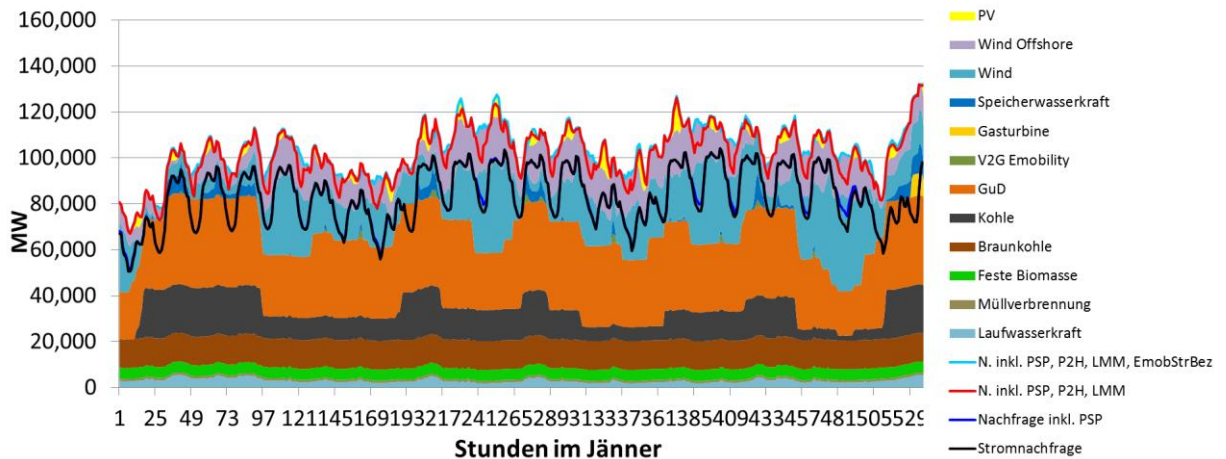
In Abbildung 8 ist beispielhaft die Stromerzeugung und der Verbrauch von Elektrizität für das Szenario marktgesteuertes und häufiges Laden (MG&HL) in Österreich und Deutschland im Sommer 2030 dargestellt. Die flächigen Bereiche zeigen die Erzeugung und die Linien die Nachfragekomponenten. Die schwarze Linie ist die normale Stromnachfrage im Jahr 2030. Die dunkelblaue Linie inkludiert zusätzlich zur normalen Stromnachfrage die Stromaufnahme durch Pumpspeicherwasserkraftwerke (PSP). Die rote Linie inkludiert zusätzlich noch die marktgesteuerte Nachfrage durch Nutzung von Strom im Wärmesektor (P2H) und industrielles Lastmanagement (LMM). Die hellblaue Linie beinhaltet zusätzlich noch den Strombezug durch das strommarktgesteuerte Laden der 6,4 Mio. Elektroautos.

Man kann erkennen, dass die Elektroautos im Sommer zur Integration der 66,5 GW PV in das Stromsystem beitragen, indem sie eine zusätzliche Last zu Mittag erzeugen und auch in den Nachtstunden für eine Nachfrageerhöhung sorgen. Ebenfalls zeigt sich, dass die simulierten Flexibilitätsoptionen, Speicherwasserkraft, industrielles Lastmanagement, Power to Heat und 6,4 Mio. Elektroautos, den thermischen Kraftwerken ermöglichen, trotz der großen Schwankungen der normalen Last und der erneuerbaren Erzeugung relativ ruhig zu fahren. Die V2G-Stromeinspeisung ist als dunkelgrüne Fläche eingezeichnet. V2G zeigt ähnliche Einsatz-Charakteristiken wie die Speicherwasserkraft und ist beispielhaft mit dem roten Pfeil hervorgehoben.

**Abbildung 8: Stromerzeugung und Verbrauch Österreich + Deutschland im Sommer 2030**



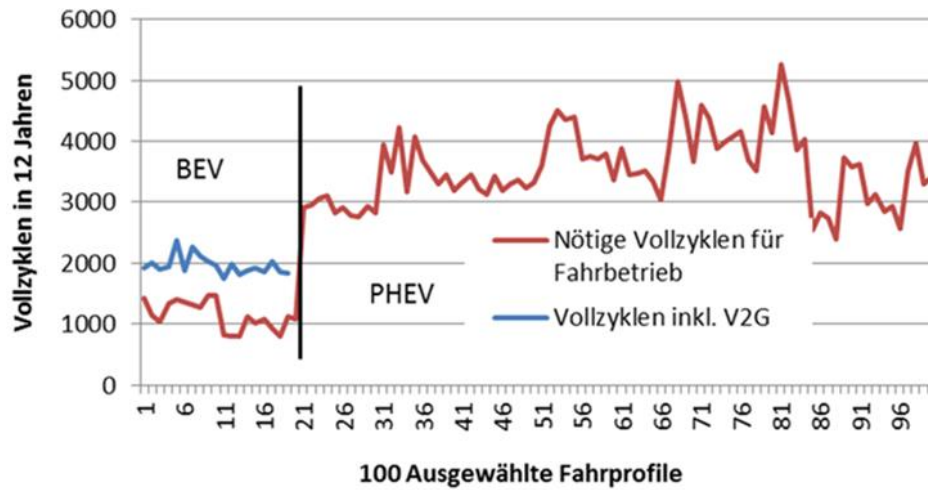
**Abbildung 9: Stromerzeugung und Verbrauch Österreich + Deutschland im Winter 2030**



Ähnlich sieht das Bild im Winter aus (siehe Abbildung 9). Nur ist hier der marktgesteuerte Elektromobilitätsstrombezug stärker auf die Nacht konzentriert und ermöglicht den thermischen Kraftwerken eine ruhige Fahrweise. Der E-Mobilitätsstrombedarf für Österreich und Deutschland mit 6,4 Mio. Elektroautos beträgt 17 TWh (ohne V2G-Strombezug). Die V2G-Stromabgabe beträgt 1,6 TWh. Wie man in Abbildung 10 sieht, wird das Ladezyklen-Limit von 3000 Vollzyklen in 12 Jahren auch bei V2G-Betrieb von BEV nicht ausgeschöpft.



Abbildung 10: Vollladezyklen für die 100 simulierten E-Mobilitätsfahrprofile.



Die maximale V2G-Stromeinspeisung beträgt 5,4GW (siehe Abbildung 11).

Abbildung 11: Der V2G-Einsatz über die 8760 Stunden des simulierten Jahres.

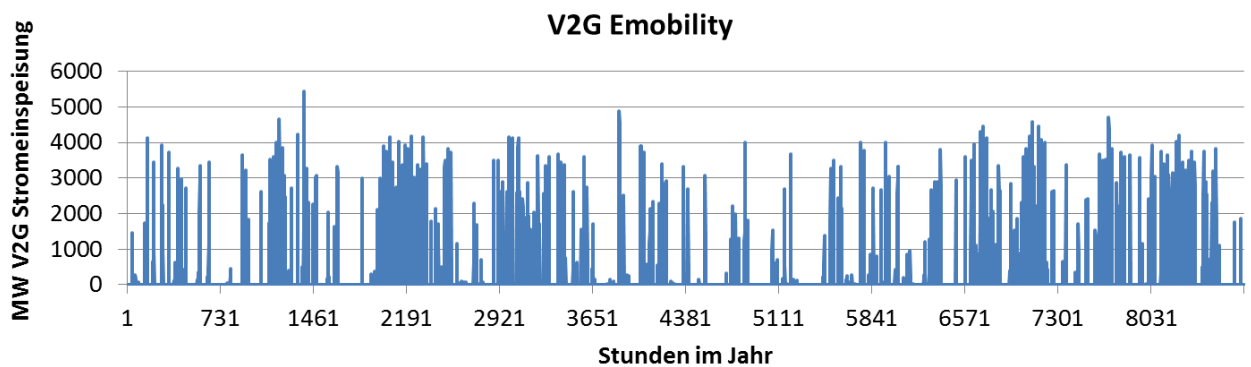
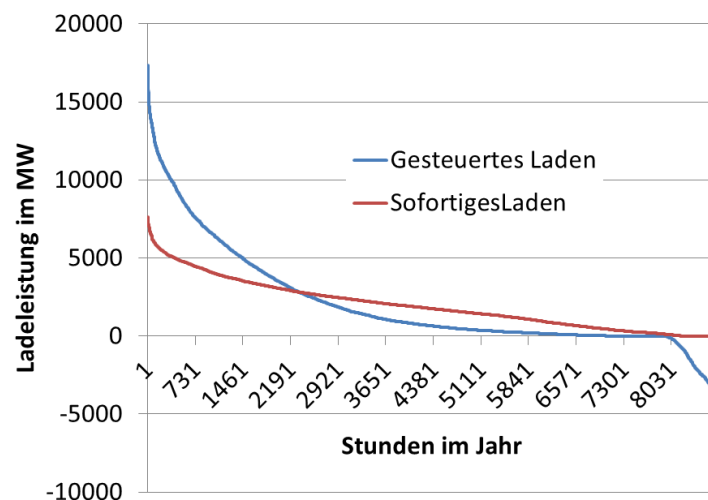


Abbildung 12: Dauerlinien der E-Mobilitätsladeleistung in den Szenarien marktgesteuertes und häufiges Laden mit V2G (MG&HL+V2G) und ungesteuertes und häufiges Laden UG&HL.



In Abbildung 12 sind die Dauerlinien für die Szenarien marktgesteuertes und häufiges Laden mit V2G (MG&HL+V2G) und ungesteuertes und häufiges Laden ohne V2G (UG&HL) dargestellt. Der maximale Ladestrom bei marktgesteuertem Laden von 6,4 Mio. PKW beträgt 17,4 GW. Der Ladestrom bei ungesteuertem Laden ist mit 7,6 GW weit geringer. Dies resultiert daraus, dass die PKW-Nutzungs- und Stehzeiten genügend verteilt sind, dass auch bei sofortigem Laden nach Ankunft in der Ladestation keine sehr große Gleichzeitigkeit entsteht. Das marktgesteuerte Laden verursacht dagegen eine deutlich höhere Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge. Dies ist aber gewünscht, da das Marktsignal (billige Strompreise) nur dann entsteht, wenn es gerade Erzeugungsüberschüsse und eine geringe Stromnachfrage gibt. Daher führt das gesteuerte Laden auch nicht zu einer Erhöhung der maximalen Stromnachfrage. Ungesteuertes Laden verursacht demgegenüber eine Erhöhung der maximalen Stromnachfrage um 7,1 GW. Wie oben beschrieben ist im HiREPS-Modell beim marktgesteuerten Laden schon im Vorhinein das Maximum der Summenleistung je Haushalt (elektrische Lasten der Haushaltsgeräte sowie von Elektrofahrzeugen und „Power-to-Heat-Anlagen) mit 3 kW begrenzt, damit es zu keinen Verletzungen der Netzrestriktionen im Niederspannungsnetz kommt. Detailliert untersucht wurden die Auswirkungen des hier simulierten marktgesteuerten Ladens auf das Niederspannungsnetz (siehe Abschnitt 5).

Die durch marktgesteuertes Laden verlagerte Strommenge im Vergleich zum ungesteuerten Laden beträgt 12,6TWh für Österreich und Deutschland 2030. Die simulierten 6,4 Mio. PKW übertreffen damit die Pumpspeicher (nach optimiertem Pumpspeicherausbau) im Bezug zur verlagerbaren Strommenge: Die Stromaufnahme der Pumpspeicher beträgt 8,3 TWh beim Szenario mit ungesteuertem Laden und 4,5 TWh beim Szenario mit marktgesteuertem Laden.

Die Kostenersparnis durch gesteuertes Laden (MG&HL) beträgt 179 Mio. Euro/Jahr oder 28 Euro pro Elektroauto und Jahr. Für die 100 simulierten Fahrprofile variiert die Stromkostenersparnis durch gesteuertes Laden (MG&HL) zwischen 52 Euro und 13 Euro pro Elektroauto und Jahr. Die Stromkostenersparnis durch V2G-Betrieb (MG&HL+V2G) beträgt 9 Mio. Euro/Jahr oder 10 Euro pro BEV und Jahr. Diese V2G-Ersparnis ist zusätzlich zur Ersparnis durch marktgesteuertes Laden. Für die 20 simulierten reinen Batterie-PKW variiert die Stromkostenersparnis zwischen 13Euro und 7Euro pro BEV und Jahr.

Die oben genannten Zahlen beruhen auf den Szenarien mit *häufigem* Laden (siehe Szenarien-Definition am Anfang). In der Begleitforschung der TU Wien zu „ElectroDrive Salzburg“ [5] zeigte sich jedoch, dass erst bei einer Stehdauer von über zwei Tagen die Hälfte der Fahrzeuge an Ladesäulen angeschlossen war. Daher wurde auch untersucht, welche Auswirkungen es hätte, wenn die Nutzer selten laden (siehe Szenarien-Definition am Anfang). Es zeigt sich, dass durch marktgesteuertes und *seltene* Laden (MG&SL) die Kostenersparnis im Vergleich zum marktgesteuerten und *häufigen* Laden (MG&HL) um 17 % abnimmt und 148 Mio. Euro/Jahr oder 23 Euro pro Elektroauto und Jahr beträgt. Für die 100 verschiedenen Fahrprofile variiert die Stromkostenersparnis durch marktgesteuertes und *seltene* Laden (MG&SL) zwischen 40Euro und 7Euro pro Elektroauto und Jahr.

Die Kostenersparnis durch V2G reduziert sich bei marktgesteuertem und *seltenem* Laden (MG&SL) im Vergleich zum MG&HL um 85 % und beträgt somit nur mehr 1,5 Mio. Euro/Jahr oder 1,50 Euro pro BEV und Jahr (im Vergleich zu 9 Mio. Euro im Szenario MG&HL+V2G). Diese V2G-Ersparnis ist zusätzlich zur Ersparnis durch marktgesteuertes Laden.

Die Anzahl der Stunden, die die Elektroautos im Durchschnitt an die Ladesäule angeschlossen sind, reduziert sich für reine BEV von 6553h im Fall von häufigem Laden auf 1811h (-72 %) im Fall von seltenem Laden. Bei Plugin-Hybrid-Fahrzeugen ändern sich diese Stunden von 6822h bei häufigem Laden auf 4702h bei seltenem Laden (-31 %).

## Schlussfolgerung

Im simulierten Elektromobilität+ Szenario 2030 von Österreich und Deutschland beträgt der Elektroauto-Anteil 13 %. Bei diesem Anteil an Elektroautos führt das marktgesteuerte Laden zu einer gleichmäßigeren, ruhigen Fahrweise der thermischen Kraftwerke und reduziert den Pumpspeichereinsatz. Wenn die NutzerInnen das Elektroauto so oft wie möglich an eine Ladesäule anschließen (hier als *häufiges* Laden bezeichnet), beträgt die Kostenersparnis 2030 für Österreich und Deutschland zusammen bei marktgesteuertem im Vergleich zum ungesteuerten Laden 179 Mio. Euro/Jahr oder 28 Euro pro Elektroauto und Jahr. Die Kostenersparnis durch V2G beträgt 9 Mio. Euro /Jahr oder 10 Euro pro BEV und Jahr. Falls die NutzerInnen von Elektroautos die PKWs nur dann an eine Ladesäule anschließen, wenn die Batterie fast leer ist und sie laden müssen, um die nächsten Fahrten möglichst viel mit Strom fahren zu können (hier als *seltene* Laden bezeichnet), reduziert sich die Kostenersparnis durch marktgesteuertes Laden um 17 % und die Kostenersparnis durch V2G um 85 % im Vergleich zum häufigen Laden.

Im MG&SL Szenario 2050 mit 100% Elektroauto-Anteil ist die durch marktgesteuertes seltenes Laden der E-PKW verlagerte Strommenge in Österreich und Deutschland 4,4-mal größer als die durch Pumpspeicherkraftwerke, nach optimiertem Ausbau, verlagerte Strommenge. Die mittlere Stromkosteneinsparung durch marktgesteuertes und seltenes Laden beträgt 51 € pro PKW und Jahr. Das sofortige ungesteuerte Laden von 48 Millionen E-PKW in Österreich und Deutschland erhöht die Spitzenlast um 16 GW. Die Kosten von 16 GW zusätzlicher gesicherter Spitzenlastherstellungskapazität betragen 16 Euro pro E-PKW und Jahr für die simulierten 48 Millionen E-PKW 2050. Die mittleren Stromgestehungskosten sinken durch die Einführung der Elektromobilität (MG&SL) von 76.9 auf 67 €/MWh. Dies kommt daher weil in allen 2050 Szenarien die CO2 Emissionen in den Sektoren Strom-, Raumwärme- und Warmwassererzeugung und PKW Verkehr für Österreich und Deutschland 2050 auf 131MtCO2 beschränkt sind. In dem Szenario ohne die Einführung der Elektromobilität muss daher mehr CO2 im Stromsektor vermieden werden und daher fallen höhere Kosten an. Nicht berücksichtigt wurden hier die IT-Kosten und die Kosten für die Anpassung der Ladesysteme an gesteuertes Laden oder V2G.

## Literatur

- [1]: Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan Strom 2013 – Entwurf (Stand: 17. Juli 2012), abgerufen am 24.10.2014, Link:  
[http://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/pdf/Szenariorahmen\\_2013.pdf](http://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/pdf/Szenariorahmen_2013.pdf)
- [2]: Andreas Krenn - Energiewerkstatt, Windatlas und Windpotentialstudie Österreich, Abschätzung des praktisch realisierbaren Windkraftpotentials, abgerufen am 24.10.2014, Link:  
<https://www.klimafonds.gv.at/assets/Uploads/4-KrennEnergiewerkstatt.pdf>
- [3]: Capros et al., Primes-Referenzszenario 2011, abgerufen am 24.10.2014, Link:  
[http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/index.php?option=com\\_content&view=category&id=35%3Aprimes](http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/index.php?option=com_content&view=category&id=35%3Aprimes)
- [4] Auskunft Benedikt Lunz Gruppe Batteriespeichersysteme bei Prof. Dirk Sauer  
[http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy\\_storage\\_systems\\_staff/](http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy_storage_systems_staff/)
- [5] Endbericht zur Begleitforschung der TU Wien in „ElectroDrive Salzburg“.

## 5. Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz durch Integration von Elektrofahrzeugen (Szenarien bis 2030)

**Markus Litzlbauer**

*Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, TU Wien*

Kurzfassung: Das Laden der Batterien von Elektrofahrzeugen wird zu einem großen Anteil dezentral im privaten Raum (Zuhause bzw. am Arbeitsplatz) stattfinden. Dies resultiert wiederum direkt in eine Zusatzbelastung der vorhandenen Niederspannungsnetze, an welche die notwendige Ladeinfrastruktur angebunden ist. Im Forschungsprojekt „DEFINE“ wurden verschiedene Durchdringungsszenarien bis 2030 gerechnet. Dabei ergibt sich einen Anteil der Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) am österreichischen Fahrzeugbestand von bis zu 16 %.

Mittels Lastflussberechnungen wurden die Auswirkungen von ungesteuertem Laden sowie marktorientiertem gesteuerten Laden an Hand eines repräsentativen Niederspannungsnetzes untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass unter den gewählten Rahmenbedingungen weder Netzkomponenten überlastet, noch Spannungsgrenzen verletzt werden.

Um die bestehenden Netzstrukturen jedoch möglichst lange und effizient nutzen zu können, wird das Laden im privaten Raum (Zuhause bzw. am Arbeitsplatz) mit niedrigen Anschlussleistungen empfohlen. Dabei ist eine symmetrische Lastaufteilung durch dreiphasiges Laden zu bevorzugen.

### Einleitung

Der Weg zu einer nachhaltigen und umweltschonenden Mobilität im motorisierten Individualverkehr wird eine zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges mit sich bringen. Diese Umstellung bedeutet jedoch, dass die Energieaufnahme nicht mehr nur an neuralgischen Punkten im (halb-) öffentlichen Raum, sondern zu einem großen Anteil dezentral in Garagen und privaten Stellplätzen erfolgen wird (Leitinger 2011). Dadurch kommt es – abhängig von Anschlussleistung und Durchdringung – zu signifikanten Zusatzbelastungen in den Niederspannungsnetzen. Diese äußern sich einerseits durch erhöhte Auslastungen der Netzkomponenten (z.B. Umspanner und Leitungen) und andererseits durch Reduktion der lokalen Netzspannung am.

Im abgeschlossenen Forschungsprojekt „V2G-Strategien“ (Prüggler 2013) wurde ermittelt, dass vor allem marktorientiertes/preisbasiertes gesteuertes Laden die Gleichzeitigkeit der Ladeprozesse – bei gleicher Anschlussleistung der Ladepunkte – wesentlich erhöht und somit die bestehenden Netzreserven deutlich stärker beansprucht als ungesteuertes Laden. Basierend auf diesem Wissen wurden im vorliegenden Forschungsprojekt „DEFINE“ bereits bei der Modellierung der Ladeprofile auf die Einhaltung der Netzrestriktionen eingegangen. Die TU Wien hat mit Hilfe von Lastflusssimulationen die Netzauswirkungen diverser Szenarien auf die Niederspannungsebene untersucht. Die Methodik sowie die Ergebnisse sind nachfolgend erläutert.

### Netzanalysen im Niederspannungsnetz

Als Basis der Netzanalysen dient eine Modellsiedlung (Maier2014), welche die österreichischen Gebäude- und Wohnverhältnisse möglichst exakt auf einen Niederspannungsabschnitt abbildet. Die Einwohnerzahl wurde dabei mit 300 Personen festgesetzt, wobei sich diese auf 126 Haushalte in 60 Gebäuden verteilen.

Damit im Modellnetz Gebiete mit höherer und niedrigerer Lastdichte gemeinsam simuliert werden können, wurde ein Mischkonzept aus Strahlennetz und offen betriebener Ringleitung gewählt. Der

offene Ring repräsentiert somit den städtischen Bereich des Verteilnetzes, während das Strahlennetz mit den z.T. langen Ausläufern verschiedene ländliche Verteilnetzbereiche darstellt.

Basierend auf den praktischen Erfahrungswerten wurden typische Kabellängen für die verschiedenen Netzgebiete und Gebäudetypen angenommen. Unter Berücksichtigung der Kabeldaten der Standardtypen wurde das elektrische Niederspannungsverteilsnetz vollständig im Lastflussprogramm NEPLAN® abgebildet. Als Anschlussleistungen wurden ebenfalls typische Werte für Haushalte entsprechend der jeweiligen Gebäudekategorie angenommen sowie die Netzknoten der Haushalte mit synthetischen, gerätebasierenden Lastprofilen für ein gesamtes Kalenderjahr hinterlegt (Zeilinger2014). Die synthetischen Lastprofile besitzen im Vergleich zu standardisierten, normierten H0-Haushaltslastprofilen den immensen Vorteil, dass sie die Höhe von Lastspitzen exakter nachbilden und somit für Analysen im Niederspannungsnetz plausible Ergebnisse liefern.

Im Forschungsprojekt „DEFINE“ wurden verschiedene Durchdringungsszenarien für Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2030 gerechnet. Dabei ergibt sich ein Anteil der Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) am österreichischen Fahrzeugbestand von bis zu 16 % (siehe Abschnitt 2). Basierend auf diesen Durchdringungen wurden verschiedene marktorientierte, gesteuerte und ungesteuerte Ladestrategien von der TU Wien angewendet (siehe Abschnitt 4) und die Ladeprofile je Elektrofahrzeug für ein gesamtes Kalenderjahr ermittelt.

Zusätzlich zu den bereits integrierten elektrischen Haushaltslasten wurden die Ladeprofile je Elektrofahrzeug den unterschiedlichen Netzknoten im Modellnetz zugeordnet.

Mittels Lastflussberechnungen wurden die Auswirkungen der diversen Szenarien auf das berücksichtigte Niederspannungsnetz ermittelt. Dabei ist ein Extremfall angenommen worden, in dem auch in der übergeordneten Netzebene ein „Starklastfall“ herrscht und somit nur mehr die restlichen Spannungsreserven von 6 % (Maier 2014) für das betrachtete Niederspannungsnetz vorhanden sind. Trotz Worst-Case-Betrachtung wurde in keinem Szenario eine Netzkomponente (Trafo oder Leitung) thermisch überlastet und die Spannungsgrenze an allen Netzknoten eingehalten.

### **Schlussfolgerung**

Für einen Anteil der Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) von bis zu 16 % am österreichischen Fahrzeugbestand mit Anschlussleistungen je Ladepunkt von 3,7 kW einphasig bzw. 11 kW dreiphasig sind keine Verletzungen der Netzrestriktionen (thermische Auslastungs- und Spannungsgrenzen) auf der Niederspannungsebene zu erwarten.

Allgemein betrachtet ist ungesteuertes Laden für den Netzbetrieb generell günstiger als marktorientiert gesteuertes Laden, da marktorientiert gesteuertes Laden mitunter eine höhere Gleichzeitigkeit der Ladeprozesse bewirkt (Prüggler 2013). Im Forschungsprojekt „DEFINE“ wurden bei der Konzeptionierung der marktorientiert gesteuerten Ladestrategien durch die TU Wien schon im Vorhinein Netzrestriktionen berücksichtigt, wodurch der Sachverhalt entschärft werden konnte (siehe dazu Abschnitt 4).

Die Ladevorgänge der Elektrofahrzeuge werden jedoch zukünftig, ab einem entsprechenden Durchdringungsgrad von Elektrofahrzeugen, unweigerlich zu Netzengpässen in Niederspannungsnetzen führen. Deshalb müssen die vorhandenen Netzreserven von vorherein durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. Laden mit geringer Ladeleistung und deren symmetrische Aufteilung durch dreiphasige Anschlüsse, geschont werden.

Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass in ausgedehnten Netzabschnitten (mit bereits hoher Auslastung) sowie an Netzknoten am Ende von langgezogenen Leitungen etwaige Netzengpässe bereits früher auftreten können.

## Literatur

- Leitinger, C., et al. (2011): „Smart Electric Mobility - Speichereinsatz für regenerative elektrische Mobilität und Netz-stabilität“, FFG-Forschungsprojekt, NE2020, 2. AS, Projektnummer: 821886, Endbericht, Wien 2011.
- Maier, Ch., Groß, Ch., Litzlbauer, M., Schuster, A., Zeilinger, F. (2014): „Eigenverbrauchssteigerung in Haushalten durch Demand-Side-Management“; Vortrag: 13. Symposium Energieinnovation, 12.-14.2.2014 Graz.
- Prügler, W., et al. (2013): „V2G-Strategien - Konzeption von Vehicle to Grid bezogenen Entwicklungsstrategien für österreichische Entscheidungsträger“, FFG-Forschungsprojekt, NE2020, 3. AS, Projektnummer: 825417, Endbericht, Wien 2013
- Zeilinger, F., Groß, Ch., Schuster, A., (2014): „Detaillierte Modellierung des Haushaltsstromverbrauchs zur Untersuchung von Demand Side Management“ ; Vortrag: 13. Symposium Energieinnovation, 12.-14.2.2014 Graz.

## 6. Ökonomische Kosten und Nutzen von Elektromobilität

### Eine modellbasierte Analyse

**Michael Miess, Stefan Schmelzer**

*Institut für Höhere Studien und wissenschaftliche Forschung (IHS), Wien*

Dieser Synthesebericht bietet einen Überblick der Hauptergebnisse einer modellbasierten Schätzung zu den Kosten und Nutzen einer erhöhten Durchdringung von Elektrofahrzeugen in Österreich. Die Aussagen werden aus einem am IHS entwickelten makroökonomischen Gleichgewichtsmodell (CGE-Modell) der österreichischen Volkswirtschaft abgeleitet, welches im Rahmen des Projekts DEFINE in Bezug auf den Verkehrssektor entscheidend weiterentwickelt wurde.

### 6.1. Einleitung

Der Sektor Verkehr ist mit 21,7 Mio. t (27% der Gesamtemissionen) 2012 einer der größten Emittenten von Treibhausgas (THG) in Österreich, der überwiegende Teil davon ist dem Straßenverkehr zuzurechnen. Die sektoralen Ziele der Klimastrategie werden im Verkehrssektor am stärksten verfehlt: die Emissionen lagen um 15% über dem sektoralen Ziel von 18,9 Mio. t im Jahr 2012, der Anstieg der Emissionen von 1990 bis 2012 betrug dabei 54% (Umweltbundesamt 2014). Diese Zahlen zeigen einen Handlungsbedarf im Verkehrssektor auf, um gegebene Umwelt- und Klimaschutzziele zu erreichen.

Elektromobilität wird oft als Ansatz dafür gesehen, die Treibhausgasemissionen des Verkehrssystems unter Beibehaltung eines hohen Anteils an motorisiertem Individualverkehr zu reduzieren. Ziel der vorliegenden Analyse ist die Beantwortung der Frage: welche Kosten und Nutzen entstehen durch eine verstärkte Durchdringung von Elektromobilität? Welche Rolle spielen dabei Anreizwirkungen des Staates, und wie wirken sich verschiedene Maßnahmen zur Förderung von Elektromobilität auf das gesamtwirtschaftliche Wachstum aus? Kann Elektromobilität die Wachstumsdynamik der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor unter volkswirtschaftlich vertretbaren Kosten brechen?

Die Analyse dieser Kosten und Nutzen wird auf Basis eines für DEFINE eigens weiterentwickelten makroökonomischen allgemeinen rechenbaren Gleichgewichtsmodells durchgeführt. Das Modell wurde spezifisch in Bezug auf das Thema Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr erweitert und zugeschnitten. Eine besondere Rolle in der Analyse spielen die Präferenzen der Haushalte bezüglich Elektromobilität in ihrer Fahrzeug-Kaufentscheidung. Die Präferenzen wurden anhand einer für Österreich repräsentativen Umfrage im Projekt ermittelt und im Makromodell implementiert. Unterschieden wurde dabei zwischen konventionellen, mit Benzin oder Diesel betriebenen Fahrzeugen (CVs), Hybriden (HEVs), Plug-in Hybriden (PHEVs), sowie batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs). In dem Modell wird die Fahrzeugflotte nach jährlichen Neuzulassungen und Ausfällen berechnet, sodass die Trägheit in den Fahrzeugbeständen im Detail berücksichtigt ist.

Der Stromsektor ist im Makromodell auf Technologieebene abgebildet und wurde anhand einer detaillierten Strommarktmodellierung durch die Technische Universität Wien auf die Anforderungen einer erhöhten Flotte an Elektrofahrzeugen angepasst.

Die privaten Haushalte sind in 9 unterschiedliche Gruppen disaggregiert. Hier wird unterschieden zwischen Haushaltstypen nach höchster abgeschlossener Ausbildung (niedrig, mittel und hoch Qualifizierte) sowie Urbanisierungsgrad (urban, sub-urban, rural), da hier unterschiedliche Effekte und Präferenzen bezüglich einer erhöhten Durchdringung von Elektrofahrzeugen angenommen wurden.

Der Staat wird im Detail abgebildet: unterschiedliche Steuerinstrumente wie Mineralölsteuer (MÖSt), Normverbrauchsabgabe (NoVA), Steuern auf Konsum, Arbeit, und Kapital, sowie verschiedene Energiesteuern für Haushalte und Firmen sind im Modell explizit dargestellt.

## 6.2. Modellsimulationen

Das Modell wurde auf einen gleichgewichtigen Wachstumspfad kalibriert (Wachstumsrate: 1%). Dieser stellt eine realistische Entwicklung der österreichischen Volkswirtschaft dar, und beinhaltet im Rahmen von DEFINE festgelegte Annahmen bezüglich des Ausbaus von erneuerbaren Technologien zur Stromgewinnung, CO<sub>2</sub>-Regulierung sowie zu Treibstoffkosten- und Fahrzeugpreisentwicklung. Auch die Novelle der NoVA und die Erhöhung der MÖSt 2011 sind darin berücksichtigt. Eine Durchdringung von Elektromobilität, sowie Ausbau des E-Tankstellensystems sind darin jedoch noch nicht abgebildet.

In unseren Simulationen wurden die folgenden Szenarien mit oben beschriebenen Wachstumspfad ohne Elektromobilität verglichen:

- Das Business-As-Usual (BAU) Szenario mit realistischer Durchdringung von E-Mobilität und ohne staatliche Lenkungsmaßnahmen, und
- Das Elektromobilität Plus (EM+) Szenario mit verstärkten staatlichen Lenkungsmaßnahmen.

Beide Szenarien wurden entsprechend der Ausarbeitung durch das Umweltbundesamt gestaltet (Umweltbundesamt 2014: Ibesich et al., DEFINE Projektbericht), siehe dazu auch Abschnitt 2 in diesem Bericht. Das Makromodell wird an dieser Stelle primär dazu eingesetzt, die zugehörigen gesamtwirtschaftlichen Kosten zu ermitteln.<sup>1</sup>

### BAU Szenario - Annahmen

Das „Business as Usual“ (BAU) Szenario beschreibt eine moderate Fortschreibung bereits implementierter oder beschlossener politischer Maßnahmen in Österreich, sowie eine Durchdringung von Elektrofahrzeugen gemäß den Fahrzeugbestandsberechnungen durch die Experten des Umweltbundesamts (UBA). Im Makromodell wurde eine Präferenzenverschiebung der Haushalte zugunsten von Elektromobilität simuliert, sodass die Flottenprognosen des BAU Szenarios des UBA für die Jahre 2008 bis 2030 (siehe Abschnitt 2) repliziert werden. Des Weiteren wurden zu erwartende Investitionen für den Infrastrukturausbau für Elektromobilität explizit berücksichtigt. Unter der Annahme von einer geringen Anzahl von 1,25 Ladestationen pro Elektrofahrzeug, Preisen an der unteren Grenze der von Herstellern gegebenen Angaben sowie einer niedrigen Anzahl an Ladestationen in geteilter (Arbeitsplatz) und öffentlicher Umgebung ergibt sich eine Gesamtinvestitionssumme von ca. 1,5 Mrd. Euro für den Zeitraum von 2008 bis 2030 in Verbindung mit den Fahrzeugbestandsberechnungen des Umweltbundesamts. Pro Elektroauto entstehen dabei Investitionen in der Höhe von ca. 2.250 Euro, wobei eine lineare Kostendegression um 33% bis zum Jahr 2030 angenommen wird, wodurch die Investitionskosten bis zu diesem Zeitpunkt auf ca. 1.500 Euro pro Elektroauto sinken. Die zusätzliche Nachfrage für die Herstellung der Ladeinfrastruktur wird zu ca. 57 % im Bausektor erbracht, ca. 33 % erfolgen im Maschinenbausektor und ca. 10 % im Dienstleistungssektor.<sup>2</sup> Es wird die Modellannahme getätigt, dass diese Investitionen aufgrund der verstärkten Marktdurchdringung von Elektromobilität vollständig auf Basis von entsprechenden Geschäftsmodellen durch den Privatsektor finanziert werden.

Die Ergebnisse des BAU Szenarios werden mit dem oben beschriebenen gleichgewichtigen Wachstumspfad ohne den Ausbau von Elektromobilität verglichen, um den Einfluss von Elektromobilität auf

<sup>1</sup> Alle Kostenangaben in diesem Abschnitt sind als reale Euro des Jahres 2008 (Basisjahr des Modells) zu lesen.

<sup>2</sup> Die Annahmen zu der sektoralen Zuordnung der Herstellung von Ladeinfrastruktur basieren auf Berechnungen im Rahmen des Projekts ECONGRID, Bliem et al. (2013).



die Entwicklung relevanter makroökonomischer Größen wie Staatseinnahmen und Bruttoinlandsprodukt (BIP) zu erhalten.

### Ergebnisse - BAU

Der Ausbau von Ladeinfrastruktur hat durch die stimulierende Wirkung der Investitionen klar positive Effekte auf das heimische BIP, die aufgrund des großen heimischen Anteils an der Wertschöpfung vor allem im Bausektor zum großen Teil im Inland verbleiben. Die positiven Nettoeffekte auf das heimische BIP bewegen sich dabei zwischen ca. 68 Mio. Euro (0,02 %) im Jahr 2015 und ca. 143 Mio. Euro im Jahr 2030 (0,03 %), mit einem gleichmäßigen Verlauf in den Jahren dazwischen.

Die verstärkte Durchdringung von Elektromobilität hingegen, die bis zum Jahr 2030 einen Bestand von 886.000 Elektrofahrzeugen in der österreichischen Fahrzeugflotte aufgrund veränderter Präferenzen der Bevölkerung mit sich bringt, hat leicht negative Effekte auf das BIP: das Wachstum sinkt um ca. 73 Mio. Euro (0,02 %) im Jahr 2015 bzw. 263 Mio. Euro im Jahr 2030 (ca. 0,07 %), ebenfalls mit einem näherungsweise linearen Verlauf für die Zwischenjahre. Dieser Rückgang lässt sich unter anderem auf Verschiebungen aufgrund der geänderten Vorleistungsstruktur<sup>3</sup> für konventionelle bzw. elektrisch betriebene Fahrzeuge sowie eine veränderte Nachfrage nach Individualverkehr zurückführen. Während durch den ersteren Effekt der Importanteil der österreichischen Wirtschaft steigt und somit das heimische BIP etwas zurückgeht, hat letzterer Effekt größere Auswirkungen. Da PHEVs und BEVs im Durchschnitt einen höheren Kaufpreis haben und somit der Konsumpreis für das Güterbündel Individualverkehr im Modell steigt, verlagern die Haushalte bei der verstärkten Durchdringung von Elektromobilität einen gewissen Teil ihrer Verkehrsleistung auf den öffentlichen Verkehr und reduzieren die Verkehrsleistung auch insgesamt um ein geringes Maß<sup>4</sup>, was in Summe einen leichten negativen Effekt auf das heimische BIP mit sich bringt.

Insgesamt ergibt sich, dass die verstärkte Durchdringung an Elektrofahrzeugen aufgrund der beiden oben skizzierten gegenläufigen Effekte geringe volkswirtschaftliche Kosten hat, von in etwa neutralen Kosten im Jahr 2015 auf Kosten von etwa 120 Mio. Euro (0,03 %) an BIP Wachstum im Jahr 2030. Durch die zusätzlichen Infrastrukturinvestitionen werden sogar positive Wachstumseffekte ausgelöst.

Hervorgehoben werden muss an dieser Stelle, dass dieses Szenario keinen absoluten Rückgang des BIPs bedeutet, sondern lediglich eine Reduktion im Vergleich zum gleichgewichtigen Wachstumspfad, der an dieser Stelle konservativ mit 1% Wachstum angenommen wurde. Im BAU Szenario wächst die österreichische Volkswirtschaft durchschnittlich mit 0,97% pro Jahr, also nur marginal um 0,03 Prozentpunkte weniger stark.

Zieht man die durch das Umweltbundesamt in Abschnitt 2 berechneten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen von 1 Mio. Tonnen heran, so ergeben sich volkswirtschaftliche Nettokosten<sup>5</sup> von 120 Euro pro eingesparte Tonne direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>6</sup>. In diesem Szenario sind jedoch im Jahr 2030 bereits mehr als 44 %

<sup>3</sup> Siehe Miess et al. (2014) für die sektorale Gliederung des Modells und Annahmen für die Konstruktion der Vorleistungsvektoren für die verschiedenen Fahrzeugtypen. Konventionelle Fahrzeuge verwenden für die Produktion nach Annahmen des IHS Makromodells fast ausschließlich Vorleistungen des Sektors Kraftwagen und Kraftwagenteile, während elektrische Fahrzeuge (PHEV und BEV) vermehrt Vorleistungen des Maschinenbausektors beziehen (Fahrzeug-Batterie).

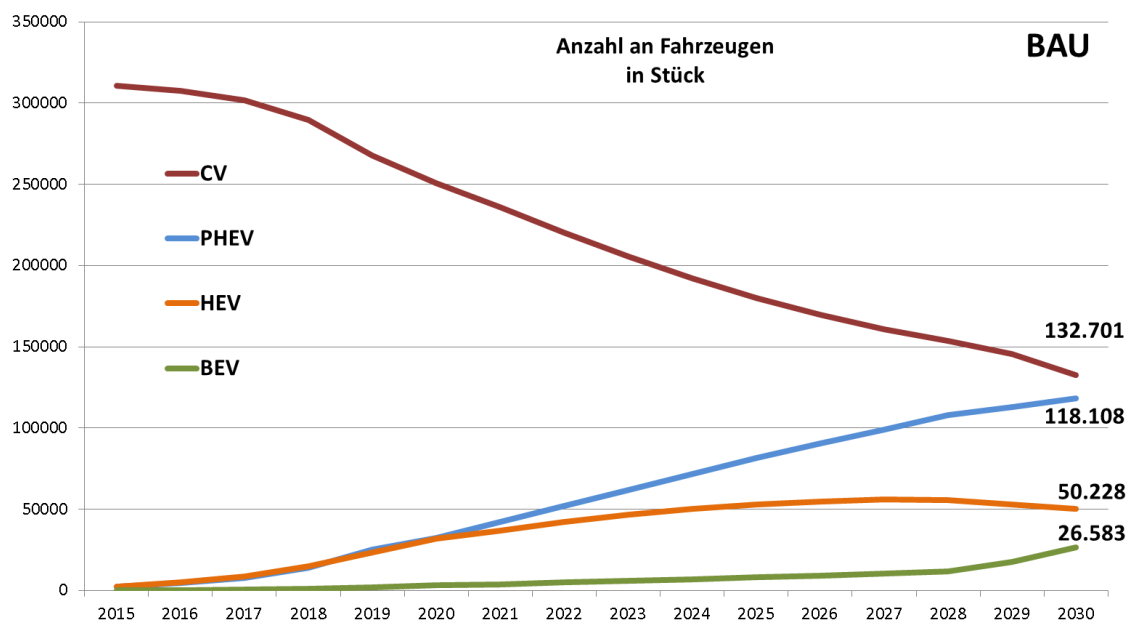
<sup>4</sup> Dieser Effekt liegt am angenommenen Konsumverhalten der Haushalte im Makromodell: durch die durchschnittlich höheren Kaufpreise für Elektrofahrzeuge wird das Gut Individualverkehr im Makromodell teurer, wodurch der Gesamtkonsum der Haushalte leicht zurückgeht, da diese Preiserhöhung nicht vollständig mittels Substitution durch andere Güter aufgefangen wird.

<sup>5</sup> Unter volkswirtschaftlichen Nettokosten werden in dem CGE Modell jene Kosten verstanden, die aufgrund des intertemporalen Optimierungsverhaltens der Haushalte nach der Politikmaßnahme netto im Vergleich zu einem Referenzszenario entstehen.

<sup>6</sup> Im Vergleich zu einschlägiger Literatur ist dieser Wert eher niedrig anzusetzen, vgl. beispielsweise Thiel et al. (2010, S. 7149). Hier liegen die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten in einem mittleren Szenario für PHEV bei 180 Euro/t CO<sub>2</sub>-Emissionen, für BEV bei ca. 15 Euro/t CO<sub>2</sub>-Emissionen. Bei einem Anteil von mehr als 90 % an PHEVs am Gesamtbestand an Elektrofahrzeugen im DEFINE

aller Neuzulassungen Elektrofahrzeuge (PHEV und BEV). Daher kann angenommen werden, dass bei Fortsetzung dieses Trends (siehe Abbildung 14 für den Verlauf der Neuzulassungen in Stückzahlen) die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor im Verlauf der Jahre ab 2030 weiter substantiell sinken werden.

Abbildung 13: Verlauf der Neuzulassungen im BAU Szenario nach Jahren



Quelle: Modellberechnungen des IHS Wien.

### EM+ Szenario - Annahmen

Das progressivere „Elektromobilität Plus“ (EM+) Szenario beschreibt eine deutliche Willensbekundung seitens der Politik zur Förderung von Elektromobilität. Es wird mit dem zuvor erläuterten Business as Usual verglichen, welches eine realistische Durchdringung von Elektromobilität darstellt, und beschreibt einen ambitionierteren Ausbaupfad von Elektromobilität. Daher wurden im EM+ Szenario neben erhöhten privaten Investitionstätigkeiten in Ladeinfrastruktur auch politische Lenkungsmaßnahmen für eine höhere Durchdringungsrate von Elektrofahrzeugen simuliert:

- Erhöhung der MÖSt in zwei Schritten:
  - 2015 und 2019: Erhöhung jeweils um 5 Cent für Benzin und Diesel
- Novelle der NoVA: Reduktion der Malus Grenze auf
  - 105 g/km ab 01.01.2015,
  - 95 g/km ab 01.01.2020.
- Ladeinfrastruktur: Ausbau in drei Stufen von niedrig - mittel - hoch bis zum Jahr 2030

Die Höhe der Investitionen für den zusätzlichen Ausbau der Ladeinfrastruktur orientiert sich an den qualitativen Merkmalen bezüglich der Ladestellenverfügbarkeit, die bei der Haushaltsumfrage in DE-

---

– BAU Szenario würden sich nach den Kostenschätzungen von Thiel et al. (2010) CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von ca. 163,5 Euro ergeben, klar über dem hier errechneten Wert von 120 Euro. Allerdings muss hinzugefügt werden, dass in dem in dieser Studie verfolgten Modellierungsansatz gesamtwirtschaftliche Kosten unter Berücksichtigung der Reaktion von Haushalten, Firmen und Staat auf Veränderungen im gesamtwirtschaftlichen Gleichgewicht errechnet werden, und somit aufgrund der unterschiedlichen analytischen Ansätze nur eine bedingte Vergleichbarkeit gegeben ist.

FINE (siehe Hanappi et al., 2013) für die verschiedenen Ausbaustufen angegebenen wurden. Dazu wurden folgende Annahmen zu den Ausbaustufen getroffen:

- Niedrig (bis 2019): Ladestationen bei privaten Garagen und Abstellplätzen verfügbar.
- Mittel (ab 2020): Ladestationen an Schlüsselstellen (Arbeitsplatz, P+R-Anlagen, Einkaufszentren, Parkgaragen) und bei privaten Garagen und Abstellplätzen verfügbar.
- Hoch (ab 2030): Ladestationen sind flächendeckend an öffentlichen Plätzen, an Schlüsselstellen und bei privaten Garagen und Abstellplätzen verfügbar.

Die Investitionshöhen zu diesen Ausbaustufen wurden in Anlehnung an vorhandene Literatur zu dem Thema (WIFO 2011, Huetter, Stigler 2012, Bliem et al. 2013, u.a.), Preisinformationen der Hersteller sowie unter eigenen Annahmen abgeleitet. Da an dieser Stelle ein Szenario der eindeutigen politischen Willensbekundung zu Elektromobilität simuliert wird, werden die Kosten pro Fahrzeug für die höchste Ausbaustufe an Ladestationen ab dem Jahr 2025 bereits früher als in dem Szenario des Umweltbundesamts (2030) angenommen.<sup>7</sup>

Das niedrig – Szenario für Ladeinfrastruktur wurde gemäß dem BAU Szenario wie oben beschrieben definiert. Für eine mittlere Verfügbarkeit an Ladestationen ab 2020 wurde mit 1,3 eine etwas höhere Anzahl an Ladestationen pro Elektroauto angenommen, mit einem verstärkten Fokus auf Ladestationen im geteilten und öffentlichen Bereich sowie auf Schnellladestationen. Die Preise für die verschiedenen Ladestationen wurden in einem mittleren Bereich der Herstellerangaben verortet. Die Bereitstellungskosten pro Elektrofahrzeug belaufen sich dabei auf ca. 3.400 Euro im Jahr 2020, wobei durch die angenommene lineare Kostendegression um 33 % dieser Betrag auf ca. 2.700 Euro bis 2025 sinkt. Ab 2025 wurden Investitionen für eine hohe Bereitstellung an Ladestationen angenommen, die bis 2030 wirksam werden und zu folgenden Verhältnissen führen: 1,5 Ladestationen pro Elektrofahrzeug, sowie ca. 45% der Ladestationen im geteilten bzw. öffentlichen Bereich, mit einem hohen Anteil an beschleunigter und Schnellladung. Hier belaufen sich die Kosten pro Elektrofahrzeug auf ca. 5.100 Euro im Jahr 2025, diese sinken aufgrund der Kostendegression auf ca. 4.450 Euro im Jahr 2030.

Die gesamte Investitionssumme für dieses Szenario beträgt ca. 4,17 Mrd. Euro in den Jahren 2008 bis 2030, wobei der Großteil der Kosten gegen Ende dieser Periode anfällt. Dies ist vor allem auf das starke Wachstum des Fahrzeugbestands an Elektrofahrzeugen in den Jahren von 2025 bis 2030 und den in diesem Zeitraum unterstellten höheren Kosten zurückzuführen.

Der Fahrzeugbestand ist im EM+ Szenario ein endogenes Ergebnis des Gleichgewichtsmodells. Haushalte reagieren auf Erhöhung von MÖst und NoVA, sowie auf die Ladestellenverfügbarkeit, und entscheiden sich vermehrt für Elektroautos. Aufgrund der verschiedenen Modellierungsansätze und methodischen Zugänge weichen die Prognosen von IHS und Umweltbundesamt (siehe Abschnitt 2) bezüglich der Fahrzeugbestände im EM+ Szenario naturgemäß voneinander ab.

## Ergebnisse - EM+

Auch in diesem Szenario lösen die Infrastrukturinvestitionen positive Wachstumseffekte aus. Die positiven Nettoeffekte bewegen sich zwischen einem zusätzlichen BIP Anstieg von 88 Mio. Euro (0,03%) im Jahr 2015 und 360 Mio. Euro (0,1%) im Jahr 2030, und liegen damit deutlich über dem BAU Szenario.

<sup>7</sup> Durch die politische Zielsetzung kann angenommen werden, dass unter anderem die Investitionssicherheit für Unternehmen in Bezug auf Elektromobilität erhöht wird und somit Investitionen durch den Privatsektor für die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur steigen. Es wird zudem unterstellt, dass die Investitionen schon im Jahr 2025 erhöht werden müssen, um bis 2030 das subjektive Empfinden einer hohen Verfügbarkeit von Ladestationen bei der Bevölkerung auszulösen. Dies stützt sich auf die qualitativ argumentierbare Hypothese, dass von einer mittleren zu einer hohen Verfügbarkeit größere Unterschiede in der Anzahl an Ladestationen notwendig sind, um der Bevölkerung eine hohe Stufe an Ladestellenverfügbarkeit subjektiv sichtbar zu machen.

Die Lenkungsmaßnahmen haben neben dem positiven Umwelteffekt einer „grünere“ Fahrzeugflotte (siehe unten) auch Auswirkungen auf die Staatseinnahmen und das BIP.

Insbesondere ist bei einer MÖSt Erhöhung (wie auch bereits 2011 beobachtet) anzunehmen, dass diese einen Rückgang des *preisbedingten Kraftstoffexports* nach sich zieht, welcher in der Modellierung explizit berücksichtigt wurde. Anhand von Berechnungen des Umweltbundesamts wurde hierzu eine Elastizität kalibriert, die in das CGE Modell eingeht und dort die Nachfrage nach Mineralölprodukten aus Österreich im Ausland, sowie dadurch anfallenden Steuereinnahmen reduziert. Da damit auch implizit angenommen wird dass keine weitere, parallel mit Österreich einhergehende Erhöhung der Mineralölsteuer in Österreichs Nachbarländern (v.a. Deutschland) stattfindet, handelt es sich hier um eine obere Abschätzung der volkswirtschaftlichen Kosten der betrachteten Lenkungsmaßnahmen. Insgesamt entgehen dem österreichischen Staat im Vergleich zum BAU Szenario dadurch Mineralölsteuereinnahmen zwischen 85 Mio. Euro im Jahr 2015 und 196 Mio. Euro im Jahr 2030, während die Exporte von Treibstoff im Jahr 2015 um 102 Mio. Euro, und im Jahr 2030 um 234 Mio. Euro zurückgehen. Des Weiteren wurde eine Nachfrageelastizität für den heimischen Konsums an Mineralölproduktion verwendet, um einen durch die MÖSt Erhöhung induzierten Entfall von Treibstoffkonsum im Inland zu berücksichtigen.<sup>8</sup> Der auf Basis dieser Elastizitäten resultierende Effekt auf den gesamten Konsum von Mineralölprodukten im In- und Ausland geht stark in die Modellergebnisse ein und ist für einen Gutteil des BIP-Rückgangs verantwortlich. Weitere Belastungen für das BIP ergeben sich durch die im Konsortium festgelegten Szenario-Annahmen zu Erhöhungen von Treibstoffkosten und Kaufpreisen von konventionell betriebenen Fahrzeugen in der Fahrzeug-Kaufentscheidung der Haushalte, die beide negativ auf den Konsum von Treibstoff und Fahrzeugen wirken.

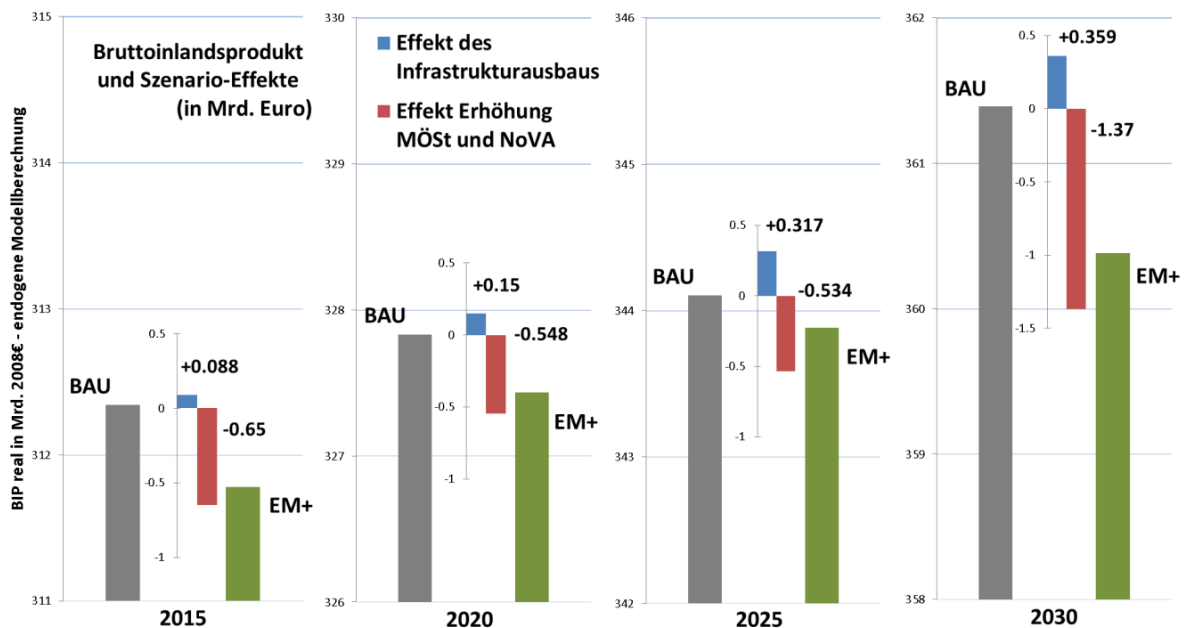
Die hemmenden Effekte der zusätzlichen Steuerbelastung durch Erhöhung von MÖSt und NoVA auf die Wirtschaftsleistung sowie der Wegfall der Einnahmen aus dem preisbedingten Kraftstoffexport für Privatwirtschaft und Staat lassen das Wachstum um ca. 650 Mio. Euro (0,2%) im Jahr 2015 und um 1,37 Mrd. Euro (ca. 0,37 %) im Jahr 2030 sinken, dazwischen in einem Verlauf beeinflusst durch die Zeitpunkte der steuerlichen Maßnahmen (vgl. Abbildung 14).

Insgesamt hat die politisch angeregte, verstärkte Durchdringung an Elektrofahrzeugen im EM+ Szenario, aufgrund der beiden oben beschriebenen gegenläufigen Effekte von Investitionen in Ladeinfrastruktur und Lenkungsmaßnahmen des Staates, im Vergleich mit dem BAU durchaus vertretbare volkswirtschaftliche Kosten, und zwar 563 Mio. Euro (ca. 0,18% des BIP) im Jahr 2015, und 1,01 Mrd. Euro (ca. 0,28%) im Jahr 2030 (siehe Abbildung 14). Im EM Szenario wächst die österreichische Volkswirtschaft durchschnittlich mit 0,95% pro Jahr von 2008 - 2030, also um 0,02 Prozentpunkte weniger stark als im BAU Szenario.

---

<sup>8</sup> Dieser Wert wurde anhand der Literatur auf den kurzfristigen Wert von -0,34 gesetzt (vgl. Brons et al. 2008), da in dem dynamischen Makromodell des IHS jährliche Preiseffekte errechnet werden und somit jedes Jahr eine Reaktion durch Haushalte und Firmen in der kurzen Frist erfolgt.

Abbildung 14: Bruttoinlandsprodukt - BAU und EM+, positive und negative Effekte in Mrd. Euro pro Jahr



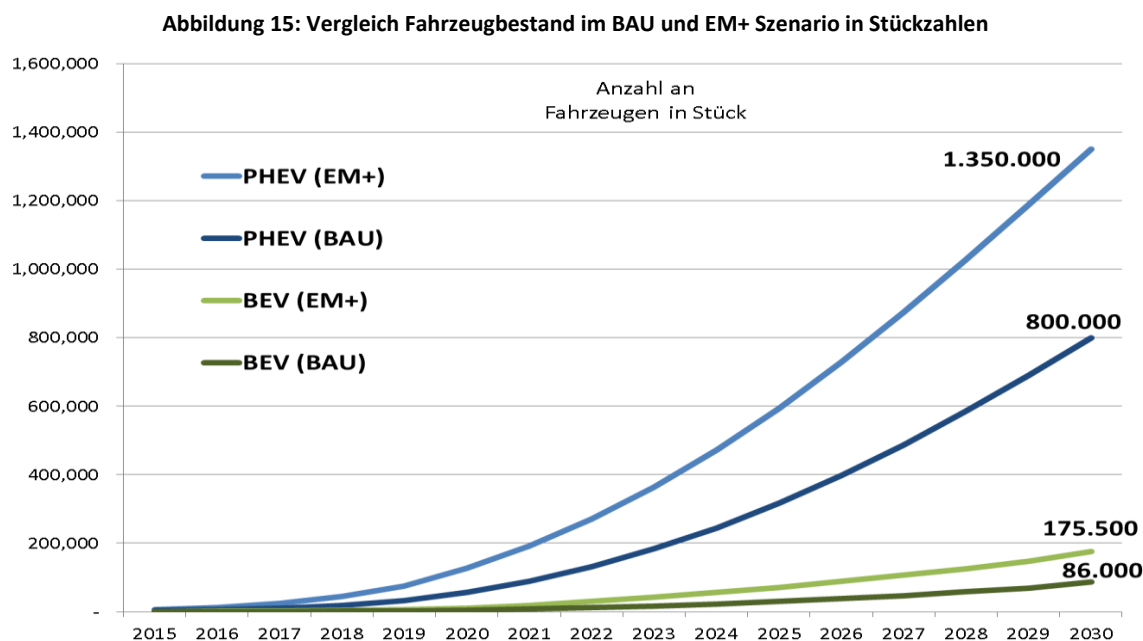
Quelle: Modellberechnungen des IHS Wien<sup>9</sup>.

In Abbildung 14 ist der Verlauf der BIP-Effekte sehr gut ersichtlich: die Kosten durch die steuerlichen Maßnahmen (die roten Balken) sind hoch in den Jahren 2015 und 2019 (Erhöhungen von MÖSt und NoVA), und gehen danach durch das Anpassungsverhalten der Haushalte 2025 ein wenig zurück. Gegen Ende der Periode bis 2030 steigen die Kosten durch die langfristigen Auswirkungen der negativen Effekte auf die Investitionsquote und den Kapitalstock, die durch den Entfall des preisbedingten Kraftstoffexports und die höhere Steuerbelastung mitverursacht werden, wieder an. Die positiven Wirkungen durch den Ausbau von Ladestationen (die blauen Balken) steigen in den Jahren ab 2025 durch den Schwenk auf den höheren Ausbaupfad für Ladeinfrastruktur deutlich. Diese beiden gegenläufigen Bewegungen ergeben im EM+ Szenario (die grünen Balken) niedrigere BIP-Levels als im BAU Szenario (die grauen Balken).

Eine Erhöhung des MÖSt Steuersatzes hat, selbst wenn dadurch die Nachfrage nach Mineralölprodukten zurückgeht und das Wirtschaftswachstum beeinträchtigt wird, trotzdem einen positiven Effekt auf die Staatseinnahmen. Dieser wird jedoch durch einen Rückgang von anderen Steuereinnahmen aufgrund der geringeren gesamtwirtschaftlichen Aktivität gemindert. Auch bei den Einnahmen aus der NoVA gibt es für den Staat einen Rückgang aufgrund der Verschiebung der Neuwagenkäufe zu den niedriger besteuerten Elektrofahrzeugen. Insgesamt ergibt sich für den Staat in diesem Szenario jedoch ein Budgetüberschuss von 508 Mio. Euro im Jahr 2015 durch die erste MÖSt Anhebung, sowie von 668 Mio. Euro im Jahr 2019 durch die zweite Anhebung. Dazwischen und danach fällt der Überschuss zwar jeweils, ist aber im Jahr 2030 bei 267 Mio Euro immer noch deutlich positiv. Im Modell wurde dieser Budgetüberschuss für mehr Staatsausgaben gemäß der Struktur des Basisjahres verwendet.

<sup>9</sup> Das BIP ist im CGE Modell ein endogenes Ergebnis. Ausgehend vom Basisjahr (2008: 291.929 Mrd. Euro) wird es real in 2008-Euro angegeben. Kurzfristige konjunkturelle Schwankungen, wie beispielsweise die Finanz- und Wirtschaftskrise 2008/2009, können in dieser Modellart nicht berücksichtigt werden, dafür wurde mit 1% eine untere Abschätzung für die mittel- bis langfristige Wachstumsrate getroffen.

Die Erhöhung von MÖst und NoVA, sowie die höhere Verfügbarkeit der Ladestationen haben nach den Ergebnissen des IHS Makromodells einen signifikant positiven Effekt auf die Neuwagenkäufe von Elektrofahrzeugen im Vergleich zum BAU. Die Anzahl von Elektrofahrzeugen in der Fahrzeugflotte steigt bis zum Jahr 2030 auf 1.525.500 (BEV: 175.500, PHEV: 1.350.000), was eine Steigerung im Vergleich zum BAU Szenario um etwa 72,1 % bedeutet. Die Anzahl an Elektromobilen ist also im EM+ Szenario beinahe doppelt so hoch (siehe Abbildung 15), wobei die prozentuelle Steigerung bei batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) mit Abstand am größten ausfällt (+104 %). Der Anteil der Elektrofahrzeuge am gesamten Fahrzeugbestand liegt hier im Jahr 2030 bereits bei 28%.

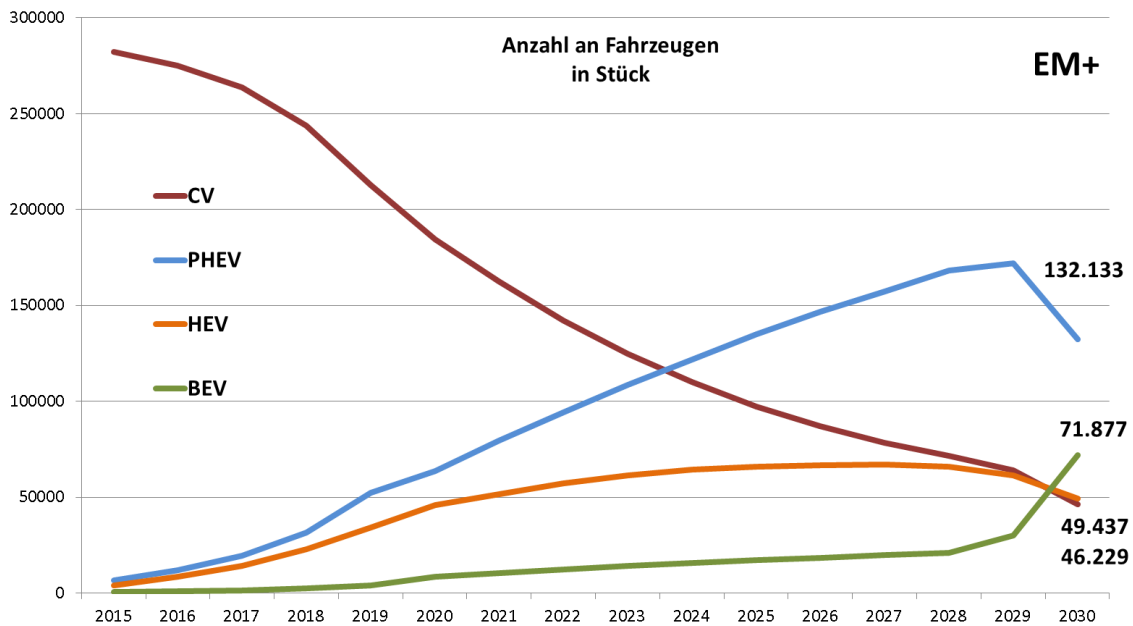


Quelle: Modellberechnungen des IHS Wien.

Die durch das Umweltbundesamt in Abschnitt 2 berechneten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen von 1,2 Mio. Tonnen würden nach den Ergebnissen des Makromodells aufgrund der höheren Penetrationsrate von Elektrofahrzeugen noch bedeutend höher ausfallen.<sup>10</sup> Der Anteil von neu registrierten Elektrofahrzeugen an den gesamten Neuzulassungen im Jahr 2030 steigt hier auf bereits mehr als 68 % an, was bei Fortsetzung des eingeschlagenen Trends eine nachfolgende starke Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verlaufe der Jahre danach in Aussicht stellt, siehe dazu Abbildung 16. In dieser Graphik ist gut ersichtlich, dass ab dem Jahr 2023 bereits weniger konventionelle Fahrzeuge verkauft werden als Plug-in Hybride, sowie dass ab 2030 (hohe Ladestellenverfügbarkeit) die Anzahl an Neuzulassungen der BEVs stark ansteigt. Mit diesem Ergebnis zeigen die für diese Studie getätigten Modellierungen klar, dass der Markt flexibel reagieren kann, wenn sich die Präferenzen der Bevölkerung ändern, und ein entscheidender Strukturwandel in Richtung Elektromobilität und damit eine entscheidende Innovationsleistung im Individualverkehrsbereich unter vertretbaren volkswirtschaftlichen Kosten möglich ist.

<sup>10</sup> Genauere Emissionsberechnungen zu diesem Szenario können erst erfolgen, sobald das entsprechende Modul für das CGE Modell durch den polnischen Partner CASE, welches sich zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch in Arbeit befindet, fertiggestellt wurde.

**Abbildung 16: Verlauf der Neuzulassungen in Stückzahlen im Elektromobilität Plus Szenario**



Quelle: Modellberechnungen des IHS Wien.

Des Weiteren sollte angemerkt werden, dass aufgrund des Wegfalls des preisbedingten Kraftstoffexports in Österreich ein entsprechender Teil der Österreich zugerechneten CO<sub>2</sub>-Emissionen entfällt, wodurch sich rechnerisch die verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen Österreichs um bis zu 30 % reduzieren könnten (vgl. Kromp-Kolb et al. 2014, S. 76)<sup>11</sup>. Dies könnte im Jahr 2030 angesichts der gegenwärtigen EU-Klimaziele und damit möglicherweise verbundenen Preisen für CO<sub>2</sub> und entsprechenden staatlichen Einsparungen weitere volkswirtschaftliche Effekte mit sich bringen, da staatliche Ausgaben, die möglicherweise für Zertifikatskäufe oder andere Zahlungen bei Nicht-Erreichung von gegebenen CO<sub>2</sub>-Zielen verwendet werden müssten, anderen Zwecken zugeführt werden können.

### Wissenschaftlicher Fortschritt in DEFINE

Für die Modellierung in DEFINE wurde das am IHS Wien entwickelte allgemeine Gleichgewichtsmodell (CGE Modell) MERCI<sup>12</sup> weiterentwickelt und angewandt.

Zu diesem Zweck wurde in DEFINE eine repräsentative Umfrage für Österreich durchgeführt (1449 Befragte), in der ein diskretes Entscheidungsexperiment zwischen Fahrzeugen mit verschiedenen Antrieben durchgeführt wurde<sup>13</sup>. Die Befragten wählten dabei in hypothetischen Kaufentscheidungssituationen zwischen verschiedenen Fahrzeugtypen aus (CV, HEV, PHEV, BEV). Auf Basis des aus diesem diskreten Entscheidungsexperiment geschätzten mikroökonomischen Modells wurde ein wissenschaftlich innovativer mikro-makro Link zwischen einem diskreten Entscheidungsmodell und dem makroökonomischen Modell MERCI geschaffen. Dadurch kann die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen, erklärt durch empirische Daten, direkt im Makromodell simuliert werden. Dies stellt einen wissen-

<sup>11</sup> Allerdings sind laut den Autoren der Studie mit dieser Schätzung große Unsicherheiten verbunden.

<sup>12</sup> Model for Electricity and Climate Change Policy Impacts. Das Modell wurde auf Basis der Literatur (Böhringer und Rutherford, 2008) auf Österreich adaptiert und erweitert. Für eine Beschreibung des für DEFINE verwendeten Grundmodells, siehe Miess et al. (2013, DEFINE Projektbericht). Das Basisjahr des Modells ist 2008.

<sup>13</sup> Zur Dokumentation der Umfrage siehe Hanappi, Mayr (2013, DEFINE Projektbericht).

schaftlich innovativen Ansatz dar, die Markteinführung einer technologischen Innovation im Transportbereich innerhalb eines rechenbaren allgemeinen Gleichgewichtsmodells darzustellen.

Zudem wurde ein detailliertes Fahrzeug-Flottenmodell im Makromodell integriert. Dabei werden Autos in Stückzahlen explizit berücksichtigt, sowie die Ausgaben der Haushalte für die Fahrzeuge, was eine zusätzliche Erweiterung zu Standard-CGE Modellen darstellt. Neuzulassungen werden dabei entsprechend der umfragebasierten Präferenzstruktur der Haushalte bei der Fahrzeug-Kaufentscheidung zwischen den verschiedenen Fahrzeugtypen berechnet. Der Ausfall pro Fahrzeugflotte richtet sich in jedem Jahr danach, wie viele Fahrzeuge 12 Perioden zuvor gekauft wurden. Somit kann Trägheit und Alter der Flotte berücksichtigt, und die jährliche Dynamik der Durchdringungsrate von Elektrofahrzeugen realistisch abgebildet werden.

Einen weiteren Fortschritt gegenüber vergleichbaren Modellen stellt die detaillierte Berücksichtigung des Strommarktes (nach stromproduzierenden Technologien)<sup>14</sup> in Verbindung mit Elektromobilität dar. Der im Makromodell im jährlichen Aggregat dargestellte Strommarkt wird auf die detaillierten Strommodellierungsergebnisse der TU Wien kalibriert und im Makromodell direkt mit der Menge an vorhandenen Elektrofahrzeugen (BEVs und PHEVs) in Verbindung gesetzt. Somit können Emissionen und Investitionskosten im Stromsystem, die durch die erhöhte Durchdringung von Elektromobilität anfallen, ebenfalls berücksichtigt werden.

### 6.3. Schlussfolgerungen

Insgesamt zeigt sich, dass Elektromobilität einen substantiellen Beitrag zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor unter vertretbaren volkswirtschaftlichen Kosten leisten kann. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist jedoch die im BAU Szenario unterstellte Präferenzverschiebung der Haushalte zu Elektromobilität, deren hier angenommenes Ausmaß sich auf die in DEFINE durchgeführte Haushaltsumfrage sowie die Modellierungen des Umweltbundesamts (Abschnitt 2) stützt.

Sowohl im BAU als auch im EM+ Szenario ergibt sich, dass Investitionen in Ladeinfrastruktur expansive Effekte haben, und somit eine Ökologisierung der Gesellschaft positiv zu wirtschaftlichem Wachstum beitragen kann.

Im Vergleich zum BAU-Referenzszenario kann die Flottendurchdringung von Elektrofahrzeugen im ambitionierteren EM+ Szenario gemäß dem hier gewählten Modellierungsansatz durch eindeutige politische Willensbekundung und eine verstärkte Besteuerung von Kauf und Betrieb konventionell betriebener Fahrzeuge fast verdoppelt werden. Diese Lenkungsmaßnahmen haben zwar leicht negative Wirkungen auf das BIP-Wachstum, schlagen sich jedoch insgesamt positiv auf die Staatseinnahmen nieder.

Durch den großen Anteil von Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen ist zudem in den Jahren nach 2030 durch den durchschnittlichen Flottenausfall von konventionellen Fahrzeugen eine große Verschiebung der Fahrzeugbestände in Richtung Elektrofahrzeuge zu erwarten. Dies zeigt, dass durch die in dieser Studie untersuchten Maßnahmen zur Förderung von Elektromobilität dem bisherigen Wachstum von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor effektiv entgegengewirkt werden kann.

Darüber hinaus zeigen die Modellierungen, dass der in dem Modell dargestellte Fahrzeugmarkt bei einer Veränderung der Präferenzen der Bevölkerung in Richtung Elektromobilität flexibel reagieren kann. Daher ist gemäß den Modellsimulationen dieser Studie ein Strukturwandel in Richtung Elektrofahrzeuge und somit eine entscheidende Innovationsleistung im Individualverkehrsbereich unter vertretbaren volkswirtschaftlichen Kosten möglich.

<sup>14</sup> Technologien im Modell: Wasser (Laufwasser sowie Pumpspeicher), Wind, Biomasse und Biogas, Photovoltaik, Deponie- und Klärgas, Erdgas, Kohle.



## Literatur

- Bliem, M., Friedl, B., Aigner, M., Schmautzer, E., Haber, A., Bitzan, G. (2013): ECONGRID - Smart Grids und volkswirtschaftliche Effekte: Gesamtwirtschaftliche Bewertung von Smart-Grids-Lösungen. Endbericht im Rahmen des Projekts ECONGRID, gefördert durch den österreichischen Klima- und Energiefonds.
- Böhringer, C., Rutherford, T. (2008): Combining bottom-up and top-down, *Energy Economics*, 30, 574 – 596.
- Brons, M., Nijkamp, P., Pels, E., Rietveld, P. (2008): A meta-analysis of the price elasticity of gasoline demand. A SUR approach, *Energy Economics*, 30, 2105–2122.
- Hanappi, T., Mayr, B. (2013): Report on Microeconomic Results, DEFINE Projektbericht, Institut für Höhere Studien.
- Huetter, D., Stigler, H. (2012): Kosten und Bepreisungsmodelle einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur für E-Mobilität in Österreich, 12. Symposium Energieinnovation, 15.-17.2.2012, Graz.
- Ibesich, N., Kasten, P., Ortner, R., Pötscher, F., Stix, S. (2014): Scenarios on potential user groups and market potential of electric vehicles for Austria up to 2030, DEFINE Projektbericht, Umweltbundesamt.
- Kromp-Kolb, H., N. Nakicenovic, R. Seidl, K. Steininger, B. Ahrens, I. Auer, A. Baumgarten, B. Bednar-Friedl, J. Eitzinger, U. Foelsche, H. Formayer, C. Geitner, T. Glade, A. Gobiet, G. Grabherr, R. Haas, H. Haberl, L. Haimberger, R. Hitzenberger, M. König, A. Köppl, M. Lexer, W. Loibl, R. Molitor, H. Moshammer, H-P. Nachtnebel, F. Prettenhaler, W. Rabitsch, K. Radunsky, L. Schneider, H. Schnitzer, W. Schöner, N. Schulz, P. Seibert, S. Stagl, R. Steiger, H. Stötter, W. Streicher, W. Winiwarter (2014): Synthese, In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC)*, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.
- Miess, M., Schmelzer, S., Janke, J. (2014): Report on Improvements in the Hybrid General Equilibrium Core Model, DEFINE Projektbericht, Institut für Höhere Studien.
- Thiel, C., Perujo, A., Mercier, A. (2010): Cost and CO<sub>2</sub> aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios, *Energy Policy*, 38, 7142 – 7151.
- WIFO (2011): Energy Transition 2012\2020\2050: Strategies for the Transition to Low Energy and Low Emission Structures. Projekt gefördert vom österreichischen Klima- und Energiefonds und durchgeführt im Rahmen des Programms “Energie der Zukunft”.
- Umweltbundesamt (2014): Klimaschutzbericht 2014.



## 7. Externe Kosten von Elektromobilität

**Milan Ščasný, Jan Weinzettell, Vojtěch Máca**

*Zentrum für Sozial- und Wirtschaftsforschung (CASE – Center for Social and Economic Research), Warschau*

**Michael Miess, Stefan Schmelzer**

*Institut für Höhere Studien (IHS), Wien*

Dieser Synthesebericht präsentiert die Ergebnisse einer Quantifizierung von positiven Umwelteffekten aufgrund einer verstärkten Einführung von Elektromobilität. Spezifisch quantifizieren wir jene Umwelteffekte, welche durch eine erhöhte Luftqualität und die Reduktion von Treibhausgasemissionen für das BAU Szenario und das Elektromobilität+ Szenario (EM+) erzielt werden. Die Auswirkungsanalyse von ExternE wurde mit dem hybriden CGE-Modell des IHS Wien verknüpft, um durch das Modell prognostizierte sektorale Auswirkungen auf die Wirtschaft mit emissionspezifischen Schadensfaktoren in Verbindung zu bringen.

Für Österreich stellen wir fest, dass im EM+ insgesamt Umweltschutzpolitik betrieben wird, d.h. das EM+ erzeugt gesamte Netto-Umweltvorteile, die sich bis 2030 kumulieren. Dabei zeigt sich, dass im EM+ Szenario im Vergleich zum BAU Szenario die Externalitäten in Bezug auf die Umwelt abnehmen, aber die jährlichen Differenzen in der absoluten Größenordnung sehr gering sind; relativ zum BAU gesehen ergibt sich eine Reduktion von Externalitäten in der Höhe von ca. -0.3%. Das EM+ Szenario erzeugt geringe Vorteile aufgrund von Änderungen in der Struktur heimischer Wirtschaftssektoren, während allein Änderungen im Brennstoffverbrauch der Fahrzeugflotte zu 2,5-Mal größeren positiven Umwelteffekten als für die restlichen Sektoren führen. Die jährlichen Vorteile für die Umwelt im EM+ Szenario betragen ungefähr 80 bis 90 Millionen EUR ab 2025. Das EM+ Szenario führt zudem aufgrund der zusätzlichen Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen zu Änderungen auf dem Elektrizitätsmarkt, welche Umweltschäden im Wert von 10 bis 33 Millionen EUR im gleichen Zeitraum verursachen, in dem die positiven Umwelteffekte durch den Wegfall von direkten Emissionen im Transportbereich erzielt werden. Dieser Umweltschaden ist jedoch nicht ausreichend groß genug, um die Vorteile für die Umwelt auszugleichen. Insgesamt bleiben die quantifizierten Nettoeffekte auf die Umwelt durch die verstärkte Einführung von Elektromobilität im EM+ Szenario daher klar positiv.

### 7.1. Methode

Die Auswirkungen einer verstärkten Einführung von Elektromobilität auf Wirtschaft und Stromerzeugung werden mittels des hybriden rechenbaren allgemeinen Gleichgewichtsmodells quantifiziert, welches in den Arbeitspaketen 1 und 6 innerhalb des DEFINE-Projekts entwickelt wurde. Die Umweltvorteile, welche der Veränderung bei Luftqualität und Treibhausgasemissionen aufgrund von Elektromobilität zuzuschreiben sind, werden dann mit Hilfe der Auswirkungsanalyse von ExternE, wie innerhalb der jüngsten ExternE-Projekte (Externalities of Energy – externe Auswirkungen von Energie) entwickelt, quantifiziert. Um die monetarisierten Umwelt- und Gesundheitsvorteile, die im Zusammenhang mit den Auswirkungen der Elektromobilität stehen, zu quantifizieren, wurden die zwei Modellierungsansätze – das hybride CGE-Modell und die ExternE Auswirkungsanalyse (Impact Pathway Analysis - IPA) – durch Emissionsfaktoren miteinander verknüpft.

Konkret erachten wir die Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen als zurechenbar zu a) direkten Emissionen, die aus der heimischen, wirtschaftlichen Produktion stammen, b) indirekten Emissionen, die man allen importierten Gütern zuschreiben kann, c) direkten Emissionen, die von Fahrzeugen aus-

gestoßen werden, und d] direkten externen Kosten im Zusammenhang mit der Elektrizitätserzeugung. Um diese Vorteile zu quantifizieren, wurden für a] Emissionsausgangsfaktoren abgeleitet, Emissionsimportfaktoren für b], sowie Emissionsbrennstoffverbrauchs-faktoren für c]. Weiters wurden Schadensfaktoren pro kWh Elektrizität, welche durch verschiedene Technologien erzeugt wird, für d] ermittelt.

Die Externe E - IPA Methode ist sehr ähnlich zu einem integrierten Auswertungsmodell, welches in amerikanischen Studien angewandt wurde, um Emissionen mit Konzentrationsänderungen, menschlicher Exposition, physikalischen Auswirkungen und finanziellen Schäden durch ein Modell für Luftverschmutzungs-Emissionsexperimente sowie Politikmaßnahmen (APEEP<sup>15</sup>, siehe z.B., Muller und Mendelsohn 2007, Muller et al. 2011) in einen Zusammenhang zu bringen. Externe E und IPA sind allgemein akzeptierte Verfahrensweisen zum Ableiten von Vorteilen neuer Regierungsentwürfe, Programme oder Politiken in Europa, oder zum Ableiten neuer Nachhaltigkeitsindikatoren (siehe z.B. Holland et al. 2014).

Um die Auswirkung möglicher Änderungen in der Technologie zu berücksichtigen, quantifizieren wir Emissionen, die der Fahrzeugnutzung und Elektrizitätserzeugung außerhalb der wirtschaftlichen Produktionsmodule zuzuschreiben sind. Während die Emissionsfaktoren wirtschaftlicher Produktion und von Importen auf der multi-regionalen, um Umweltdaten erweiterten Input-/Output-Datenbank CREEA, welche den Zustand der Wirtschaft im Jahr 2007 beschreibt, basieren, werden die Emissionsfaktoren für die zwei Schlüsseltechnologien anderweitig abgeleitet. Insbesondere die Emissionsfaktoren pro Brennstoffverbrauch bei PKWs und Frachttransporten basieren auf dem REMOVE-Modell, von dem wir zeitvariante Emissionsfaktoren erzeugen. Mit Hilfe der Datenbank von CASE über externe Kosten für einen breiten Satz an Technologien leiten wir Schadensfaktoren für jede elektrizitätserzeugende Technologie ab, die in dem Elektrizitätsmodell eingeschlossen sind, welches im Hybrid-CGE-Modell inbegriffen ist.

## 7.2. Ergebnisse für Sektoren

Über den Zeitraum 2008-2030 wird der Brennstoffverbrauch in Österreich um 19% im Ausgangsszenario ansteigen, hauptsächlich bei anderen Transportmitteln als bei PKWs. Das EM+ Szenario führt zu einem geringeren Verbrauch von Kraftstoffen bei Autos, aber der gesamte Verbrauch steigt mit der Zeit an. Die externen Kosten, die den Emissionen zuzuschreiben sind, die durch den Kraftstoffverbrauch bei Autos ausgestoßen werden, werden im Jahr 2008 auf ungefähr 1.636 Millionen Euro geschätzt. Trotz der Tatsache, dass der Kraftstoffverbrauch mit der Zeit ansteigt (um 16% bei PKWs, oder entsprechend um 24% beim Frachttransport) geht der Gesamtschaden im Ausgangsszenario als Ergebnis eines ansteigenden Anteils von Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen (Alternative Fuel Vehicles – AFV) und der zurückgehenden Emissionsintensitäten mit der Zeit zurück. Als Ergebnis erreichen externe Auswirkungen einen Wert von 1.233 Millionen Euro bis zum Jahr 2030 (um 25% weniger als im Jahr 2008). Die Maßnahmen im EM+ Szenario verlangsamten den Anstieg im Kraftstoffverbrauch (lediglich um +6% bzw. um +20%), und fördern gleichzeitig die Flottendurchdringung von Elektrofahrzeugen. Infolgedessen gehen die externen Gesamtkosten des EM+ auf 1.168 Millionen Euro im Jahr 2030 zurück, das sind 29% weniger als im Referenzjahr 2008. Am Ende des Zeitraums sind im EM+ Szenario die externen Kosten, die PKWs zuzuschreiben sind, um 9% geringer als im BAU. Externe Auswirkungen, die durch den restlichen Kraftstoffverbrauch entstehen, sind fast um 6% geringer im

<sup>15</sup> Air Pollution Emission Experiments and Policy model

EM+ als im BAU. Absolut beurteilt werden die externen Kosten um ungefähr 40 Millionen Euro in der zweiten Dekade in 2020 reduziert und sind um 65 Millionen Euro geringer in der nächsten Dekade.

Das EM+ Szenario wird zu einem Anstieg im Elektrizitätsverbrauch um 27% über den gesamten Zeitraum 2008-2030, im Vergleich mit dem BAU für Österreich, führen. Der Anteil von Kohle und Wasser verringert sich, wohingegen die Nachfrage nach Erdgas, Windkraft und PV sowohl im BAU als auch im EM+ ansteigt. Das EM+ Szenario beinhaltet einen leicht höheren Verbrauch an Erdgas bei der Energieerzeugung. Die Auswirkung auf den Technologiemitel im EM+ ist jedoch sehr gering. Die externen Kosten, die der Elektrizitätserzeugung im Referenzjahr zuzuschreiben sind, belaufen sich auf 502 Millionen Euro; Klimaveränderungen tragen mit dem größten Anteil dazu bei, nämlich ungefähr 56%, während Gesundheitsauswirkungen mit einem Anteil von ungefähr 40% ausmachen. Eine höhere Erzeugung von Elektrizität involviert außerdem höhere, externe Auswirkungen. Der Schaden im Jahr 2030 beläuft sich auf 689 Millionen Euro bei BAU und 722 Millionen Euro bei EM+. Relativ betrachtet ist der Schaden im EM+ um 5% höher.

Die gesamten, externen Auswirkungen, die allen wirtschaftlichen Sektoren in Österreich zuzuschreiben sind, ausgenommen den Sektoren KRAFTSTOFF und ELEKTRIZITÄT, belaufen sich auf ungefähr 25 Milliarden Euro im Referenzjahr. Ein großer Teil dieses Schadens entsteht durch indirekte Emissionen, d.h. durch Emissionen, die außerhalb von Österreich ausgestoßen werden und in den Nettoimporten von Waren und Dienstleistungen eingebettet sind. Diese indirekten Emissionen belaufen sich auf 14,3 Milliarden Euro, die Verbrennungsemissionen zuzuschreiben sind, und zusätzlichen 2,3 Millionen Euro, die Emissionen zuzuschreiben sind, die nicht durch die Verbrennung entstehen. Direkte Emissionen, d.h. Emissionen, die von Quellen in Österreich ausgestoßen werden und aus Verbrennungsvorgängen stammen, tragen mit geschätzten 6,8 Milliarden Euro dazu bei, Verfahren ohne Verbrennung liefern weitere 1,9 Milliarden Euro. Externe Auswirkungen, die der heimischen, wirtschaftlichen Herstellung und Importen zuzuschreiben sind, steigen mit der Zeit an und erreichen insgesamt einen Stand von ca. 31,43 Milliarden Euro im Jahr 2030 beim BAU-Szenario und mehr oder weniger denselben Betrag im EM+-Szenario (31,36 Milliarden Euro). Das EM+ Szenario erzeugt ungefähr 68 Millionen Euro an externen Auswirkungen im Jahr 2030 weniger als das BAU Szenario. Relativ betrachtet bedeutet dies eine Reduktion um ungefähr 0,2% im Jahr 2030.

### **7.3. Ergebnisse: Externe Gesamtkosten**

Wenn man alle externen Kosten durch heimische Produktion in den verschiedenen Wirtschaftssektoren, durch Brennstoffverbrauch und Elektrizitätsherstellung zusammennimmt, erhält man einen Gesamtwert an externen Kosten, der sich auf ungefähr 27 Milliarden Euro im Referenzjahr und 33 Milliarden Euro im Jahr 2030 beläuft. Dieser Wert beinhaltet außerdem die Auswirkungen, die den Nettoimporten zugeschrieben werden, welche in den indirekten Emissionen inbegriffen sind. Der Gesamtwert der externen Auswirkungen entspricht ungefähr 4% der Wertschöpfung der österreichischen Wirtschaft im Jahr 2008.

Das EM+-Szenario erzeugt niedrigere externe Auswirkungen, aber die Unterschiede von Jahr zu Jahr sind insgesamt sehr klein in der absoluten Größenordnung – ungefähr 100 Millionen Euro kleiner als bei dem BAU-Szenario 2030, also eine relative Verringerung von ca 0,3%. Wir erhalten qualitativ ähnliche Ergebnisse für die externen Auswirkungen, die den direkten Emissionen zuzuschreiben sind, diese entsprechen ungefähr 1,3% österreichischen Wertschöpfung.

**Abbildung 17: Externe Gesamtkosten in Millionen EUR – direkte und indirekte Emissionen, 2008-2030, Österreich**

	BAU, in Millionen EUR					EM+, in Millionen EUR				
	direkt komb.	direkt nicht komb.	indirekt komb.	indirekt nicht komb.	Gesamtsumme	direkt komb.	direkt nicht komb.	indirekt komb.	indirekt nicht komb.	Gesamtsumme
<b>2008</b>	8 902	1 900	14 311	2 322	<b>27 435</b>	8 898	1 899	14 304	2 320	<b>27 422</b>
<b>2009</b>	8 998	1 920	14 458	2 346	<b>27 722</b>	8 991	1 919	14 451	2 345	<b>27 706</b>
<b>2010</b>	9 455	1 940	14 606	2 370	<b>28 371</b>	9 447	1 939	14 600	2 369	<b>28 356</b>
<b>2011</b>	9 540	1 957	14 735	2 390	<b>28 622</b>	9 533	1 956	14 731	2 389	<b>28 608</b>
<b>2012</b>	8 920	1 977	14 882	2 414	<b>28 193</b>	8 912	1 976	14 879	2 413	<b>28 180</b>
<b>2013</b>	9 564	1 997	15 029	2 439	<b>29 029</b>	9 554	1 996	15 028	2 438	<b>29 016</b>
<b>2014</b>	8 914	2 017	15 178	2 463	<b>28 571</b>	8 904	2 016	15 179	2 463	<b>28 563</b>
<b>2015</b>	9 769	2 037	15 328	2 488	<b>29 622</b>	9 721	2 034	15 310	2 482	<b>29 547</b>
<b>2016</b>	9 295	2 057	15 480	2 513	<b>29 345</b>	9 247	2 054	15 464	2 508	<b>29 273</b>
<b>2017</b>	9 887	2 078	15 634	2 538	<b>30 138</b>	9 840	2 075	15 621	2 533	<b>30 069</b>
<b>2018</b>	9 522	2 099	15 791	2 564	<b>29 977</b>	9 476	2 097	15 782	2 560	<b>29 914</b>
<b>2019</b>	9 276	2 121	15 951	2 590	<b>29 938</b>	9 197	2 116	15 926	2 581	<b>29 820</b>
<b>2020</b>	9 405	2 142	16 113	2 617	<b>30 276</b>	9 328	2 137	16 090	2 608	<b>30 163</b>
<b>2021</b>	9 487	2 164	16 274	2 643	<b>30 568</b>	9 411	2 159	16 254	2 634	<b>30 458</b>
<b>2022</b>	9 573	2 186	16 438	2 669	<b>30 866</b>	9 499	2 181	16 419	2 661	<b>30 760</b>
<b>2023</b>	9 661	2 208	16 603	2 696	<b>31 169</b>	9 590	2 204	16 585	2 688	<b>31 066</b>
<b>2024</b>	9 752	2 230	16 769	2 723	<b>31 474</b>	9 683	2 226	16 752	2 715	<b>31 375</b>
<b>2025</b>	9 844	2 253	16 936	2 750	<b>31 783</b>	9 779	2 248	16 921	2 742	<b>31 690</b>
<b>2026</b>	9 937	2 275	17 104	2 777	<b>32 093</b>	9 875	2 270	17 087	2 769	<b>32 002</b>
<b>2027</b>	10 031	2 298	17 273	2 805	<b>32 406</b>	9 971	2 293	17 254	2 796	<b>32 314</b>
<b>2028</b>	10 126	2 320	17 442	2 832	<b>32 720</b>	10 067	2 315	17 420	2 823	<b>32 625</b>
<b>2029</b>	10 220	2 343	17 613	2 860	<b>33 036</b>	10 163	2 337	17 586	2 850	<b>32 935</b>
<b>2030</b>	10 313	2 366	17 786	2 887	<b>33 353</b>	10 256	2 360	17 758	2 877	<b>33 252</b>

Unterschiedliche Sektoren tragen zum Gesamtergebnis bei den externen Auswirkungen, welche den direkten Emissionen zugeschrieben werden können, unterschiedlich bei. Wir fanden heraus, dass das EM+ Szenario geringe Vorteile aufgrund von Änderungen in der Struktur heimischer Wirtschaftssektoren erzeugt, während Änderungen in der Zusammensetzung von Fahrzeugflotten (höherer Anteil an Elektromobilität), und somit auch im Brennstoffverbrauch, ungefähr zu 2,5-Mal größeren Umweltvorteilen als bei der Änderung der allgemeinen Wirtschaftsstruktur führen. Die jährlichen brutto-Umweltvorteile im EM+ betragen ungefähr 80 bis 90 Millionen EUR nach 2025. Das EM+ Szenario führt jedoch außerdem zu Änderungen auf dem Elektrizitätsmarkt, welche gegenteilig Schäden im Wert von 10 bis 33 Millionen EUR im gleichen Zeitraum erzeugen, in dem die Vorteile erzeugt werden. Dieser Umweltschaden ist jedoch nicht ausreichend groß genug, um die Umweltvorteile auszugleichen und insgesamt die Nettovorteile aufzuwiegen.

**Abbildung 18: Auswirkung des EM+ Szenarios auf die externen Gesamtkosten, welche direkten Emissionen zugeschrieben werden können, 2008-2030, Österreich**

	Unterschied EM+ vs. BAU, in Millionen EUR				Prozent Änderung EM+ vs. BAU			
	Sektoren	BRENNSTOFF	ELEKT.	GESAMT	Sektoren	BRENNSTOFF	ELEKT.	GESAMT
<b>2008</b>	-2.8	-1.3	0.0	<b>-4.1</b>	-0.04%	-0.08%	0.00%	<b>-0.05%</b>
<b>2009</b>	-2.8	-3.1	-1.6	<b>-7.5</b>	-0.04%	-0.19%	-0.31%	<b>-0.08%</b>
<b>2010</b>	-2.4	-4.8	-0.3	<b>-7.5</b>	-0.04%	-0.28%	-0.03%	<b>-0.08%</b>
<b>2011</b>	-1.9	-5.9	-0.1	<b>-7.9</b>	-0.03%	-0.38%	-0.01%	<b>-0.08%</b>
<b>2012</b>	-1.3	-7.0	-0.2	<b>-8.4</b>	-0.02%	-0.47%	-0.06%	<b>-0.09%</b>
<b>2013</b>	-0.6	-8.0	-1.8	<b>-10.3</b>	-0.01%	-0.56%	-0.17%	<b>-0.11%</b>
<b>2014</b>	0.4	-9.0	-0.5	<b>-9.1</b>	0.01%	-0.67%	-0.12%	<b>-0.10%</b>
<b>2015</b>	-5.9	-40.6	-1.8	<b>-48.4</b>	-0.08%	-3.20%	-0.14%	<b>-0.50%</b>
<b>2016</b>	-6.4	-40.6	-0.8	<b>-47.8</b>	-0.09%	-3.33%	-0.11%	<b>-0.51%</b>
<b>2017</b>	-6.3	-40.5	-0.5	<b>-47.3</b>	-0.09%	-3.43%	-0.04%	<b>-0.48%</b>
<b>2018</b>	-5.6	-40.4	-0.5	<b>-46.5</b>	-0.08%	-3.50%	-0.05%	<b>-0.49%</b>
<b>2019</b>	-11.6	-66.0	-0.4	<b>-78.1</b>	-0.15%	-5.80%	-0.07%	<b>-0.84%</b>
<b>2020</b>	-12.0	-65.8	0.7	<b>-77.1</b>	-0.16%	-5.82%	0.11%	<b>-0.82%</b>
<b>2021</b>	-12.4	-65.9	2.5	<b>-75.8</b>	-0.16%	-5.83%	0.38%	<b>-0.80%</b>
<b>2022</b>	-12.7	-66.2	4.7	<b>-74.1</b>	-0.16%	-5.84%	0.70%	<b>-0.77%</b>
<b>2023</b>	-12.9	-66.3	7.3	<b>-71.9</b>	-0.16%	-5.82%	1.08%	<b>-0.74%</b>
<b>2024</b>	-13.2	-66.4	10.3	<b>-69.3</b>	-0.17%	-5.78%	1.50%	<b>-0.71%</b>
<b>2025</b>	-12.6	-66.3	13.9	<b>-65.0</b>	-0.16%	-5.72%	2.01%	<b>-0.66%</b>
<b>2026</b>	-13.7	-66.1	17.4	<b>-62.4</b>	-0.17%	-5.65%	2.51%	<b>-0.63%</b>
<b>2027</b>	-15.3	-65.9	21.1	<b>-60.1</b>	-0.19%	-5.57%	3.03%	<b>-0.60%</b>
<b>2028</b>	-17.5	-65.7	24.9	<b>-58.4</b>	-0.21%	-5.48%	3.58%	<b>-0.58%</b>
<b>2029</b>	-20.5	-65.7	28.8	<b>-57.4</b>	-0.25%	-5.40%	4.16%	<b>-0.56%</b>
<b>2030</b>	-24.0	-65.8	33.0	<b>-56.9</b>	-0.29%	-5.34%	4.79%	<b>-0.55%</b>

Wir weisen Sie vorsorglich darauf hin, unsere Schlüsse für Österreich nicht zu verallgemeinern, da das Gesamtergebnis der Auswirkung von Elektromobilität auf externe Kosten stark von dem Technologiemix abhängt, mit dem Elektrizität erzeugt wird. Positive Ergebnisse für Österreich werden zum Teil von einem umweltfreundlichen Technologiemix zur Erzeugung von Elektrizität bestimmt, wohingegen ein umweltbelastender Technologiemix in der Stromerzeugung netto-Umweltvorteile von Elektromobilität zu netto-Umweltschäden aufwiegen könnte.

### Literatur

- Holland M (2014). Cost-benefit Analysis of Final Policy Scenarios for the EU Clean Air Package, Version 2, Corresponding to IIASA TSAP Report #11, Version 1. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Muller NZ, Mendelsohn RO (2007) Measuring the damages of air pollution in the United States. Journal of Environmental Economics and Management 54(1):1–14
- Muller NZ, Mendelsohn RO, Nordhaus WD (2011) Environmental accounting for pollution in the United States economy. American Economic Review.

## 8. Präferenzen für alternativ betriebene Fahrzeuge in Polen

Milan Ščasný, Iva Zvěřinová, Mikolaj Czajkowski

Zentrum für Sozial- und Wirtschaftsforschung (CASE – Center for Social and Economic Research), Warschau

Dieser Synthesebericht liefert die Ergebnisse einer Original-Umfrage, die bei der polnischen Bevölkerung durchgeführt wurde, um das Potential und die Hindernisse zur Annahme und Akzeptanz alternativer Kraftstofffahrzeuge zu erkennen. Verbraucherpräferenzen wurden mit Hilfe von Daten aus einem Original-Umfragebogen ausgewertet, der für die Meinung der erwachsenen, polnischen Bevölkerung und Personen steht, die vorhaben, sich ein Auto zu kaufen. Die Ladezeit, Verfügbarkeit von Aufladestationen und die Reichweite sind derzeit die wichtigsten Hindernisse bei der Entwicklung eines Marktes für Fahrzeuge, die mit Elektrizität betrieben werden. Das Anbieten anderer Vorteile, wie zum Beispiel kostenloses Parken und öffentlicher Verkehr, erhöht die Wahrscheinlichkeit, sich für elektrisch betriebene Fahrzeuge zu entscheiden. Die Käufer von Gebrauchtwagen nannten vorbehaltlos den Willingness-to-Pay(WTP)-Wert<sup>16</sup> für kostenlosen, öffentlichen Transport für alle Familienmitglieder von 1,700 zł und den Wert für kostenloses Parken in Polen von 2,550 zł. Das Neuwagensegment nannte höhere WTPs - 5,300 zł und 6,600 zł. Mit Hilfe der Schätzwerte und der Simulation der Auswirkung des Kaufpreises und der Betriebskosten auf die Wahrscheinlichkeit, ein bestimmtes Fahrzeug zu kaufen, wurden die Preiselastizitäten für verschiedene Haushaltssegmente abgeleitet. Zum Beispiel sind weniger gebildete Befragte sensibler für den Kaufpreis konventioneller Autos und fast empfindungslos gegenüber den Änderungen der Betriebskosten.

### 8.1. Motivation und Ziele

Die Elektromobilität wird als Teil einer Strategie angesehen, die Abhängigkeit der Europäischen Union von Öl und anderen fossilen Brennstoffen zu reduzieren, die Luftqualität zu verbessern, Lärm in ländlichen/vorstädtischen Ballungsräumen zu reduzieren und zu einer CO<sub>2</sub>-Reduzierung beizutragen (Richtlinie 2014/94/EU). Die Richtlinie 2014/94/EU legt fest, dass jeder Mitgliedsstaat nationale, politische Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines alternative Kraftstoffmarkts übernehmen soll und der Kommission einen Bericht über dessen Implementierung übermitteln soll, welcher unter anderem die politischen Maßnahmen beschreiben soll, welche in einem Mitgliedsstaat unternommen wurden, um die Einsetzung/Entwicklung von Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen, einschließlich mit Elektrizität betriebene Fahrzeuge, zu unterstützen. Um nationale, politische Rahmenbedingungen auszuarbeiten und die Entwicklung eines alternativen Kraftstoffmarkts zu fördern, ist das Verständnis des Verbraucherverhaltens, und dessen Präferenzen für Fahrzeuge mit alternativen Kraftstoffen, u.a. sehr wichtig.

Aus diesen Gründen sind die Ziele unserer Forschung, die in diesem Projekt durchgeführt wurde, folgende:

- i) Faktoren zu erkennen, die den Kauf von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen beeinflussen, und
- ii) Verbraucherpräferenzen zu untersuchen und die Bereitschaft einzuschätzen, für drei elektrisch betriebene Fahrzeuge zu bezahlen: Hybrid (HV), Plugin-Hybrid (PHEV) und Elektrofahrzeuge (Electrical Vehicles - EV).

<sup>16</sup> Wert der Zahlungsbereitschaft



Die Verbrauchernachfrage nach gewissen Gütern kann mit Hilfe der existierenden Daten über die Marktdurchdringung oder Verbraucherentscheidungen (offenbarte Präferenzen) modelliert werden. Wenn jedoch die Versorgung mit gewissen, langlebigen Gütern/Waren eingeschränkt ist oder gegen Null geht, wie das der Fall bei neuen oder noch nicht bestehenden Technologien ist, kann eine potentielle Nachfrage mit Hilfe von bekundeten Präferenzmethoden abgeschätzt werden. Das Hauptziel unserer Umfrage ist es, die Verbraucherpräferenzen für transportbezogene Gebrauchsgüter zu analysieren, welche kürzlich durch unwesentliche oder keine Marktdurchdringung charakterisiert wurden. Mit anderen Worten, individuelle Präferenzen werden erhoben und die Nachfrage nach PKWs mit alternativ angetriebenen Technologien, sowie nach transportspezifischen Innovationen, wird ausgewertet. Um diese Ziele zu erreichen wird ein diskretes Entscheidungsexperiment durchgeführt, um Verbraucherpräferenzen für verschiedene Fahrzeugattribute zu abzufragen.

## 8.2. Ergebnisse der Literaturrecherche

Die genannten Präferenzmethoden, insbesondere die diskreten Entscheidungsexperimente, dienen als hilfreiche Werkzeuge, um Präferenzen für spezifische Attribute von Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen zu erheben, somit eine Unterstützung für die Politik zu bieten und dabei behilflich zu sein, ein Marktpotential für neue Technologien und deren Marktanteil vorauszusehen. Selbst hypothetische Attributebenen können in den diskreten Entscheidungsexperimenten eingeschlossen werden, wie z. B. die Reichweite der elektrischen Fahrzeuge, die besser ist, als in jedem verfügbaren, heutigen Markt, um die Verbraucherpräferenzen für eine solche technische Verbesserung zu untersuchen.

Die Kraftstofftypen der Fahrzeuge, die den Befragten in den diskreten Entscheidungsexperimenten vorgestellt wurden, spiegeln die aktuellen und auch die möglichen Technologien in den betroffenen Ländern wider. Bei den meisten Studien gibt es einerseits ein konventionelles Fahrzeug, das durch Benzin (oder zusätzlich Diesel) vertreten wird, die anderen Kraftstoffarten, wie zum Beispiel komprimiertes Erdgas (CNG), verflüssigtes Erdgas (Liquefied Petroleum Gas - LPG), und andererseits kohlenstoffarme Fahrzeuge werden durch Hybrid-, Elektro- oder Wasserstofffahrzeuge vertreten.

Die meisten Studien offenbarten die Bereitschaft, einen Schätzwert für verschiedene Attribute zu bezahlen. Es gibt keinen ausreichenden Beweis darüber, ob die Verbraucher Fahrzeuge mit alternativen Kraftstoffen (AFVs) konventionellen Fahrzeugen vorziehen würden. Verbraucherpräferenzen hängen sowohl von der i) Charakteristik der Befragten, als auch von der ii) Charakteristik der Fahrzeuge ab. Die Präferenz und somit die Bereitschaft für AFVs zu bezahlen, erhöht sich mit der Länge der Reichweite, der Kraftstoffverfügbarkeit, der Leistung des Autos (Motorleistung), der Reduktion von Treibhausgasemissionen, politischen Anreizen (Erlass der Fahrzeugsteuer, kostenloses Parken, Erlaubnis auf Busspuren zu fahren), und senkt sich mit der Länge der Aufladezeit (Nachtankzeit), den Anschaffungskosten, den Kraftstoff- und Wartungskosten.

Eine kurze Reichweite und eine lange Batterieladezeit sind wichtige Hinderungsgründe für den Kauf von AVTs, denn beide bieten den Autokäufern erhebliche Beeinträchtigungen.

- Der Grenznutzen einer Erhöhung der Reichweite um 1 Km liegt bei ca. 10 bis 60 EUR pro Auto.
- Der Nutzen der Verringerung der Batterieladezeit um eine Minute liegt in einem ähnlichen Bereich, jedoch ist der Nachteil in Bezug auf das Wiederauffüllen von Wasserstofffahrzeugen größer im Vergleich zum Nachteil bei einer Batterieaufladung elektrischer Hybridfahrzeuge oder Plugin-Hybridfahrzeuge. Die Verbraucher sind bereit mehr zu zahlen, wenn sie dafür ihr Auto nicht jeden Tag aufladen müssen, sondern nur jeden zweiten Tag oder einmal pro Woche.

- Die Hinderungsgründe in Verbindung mit der Reichweite und der Aufladezeit scheinen der Hauptgrund zu sein, warum die Menschen dazu tendieren, die Hybridtechnologie den elektrischen Fahrzeugen vorzuziehen. Aufgrund der eingeschränkten Reichweite der Elektroautos werden diese Gründe als unzureichend für spezielle Fahrten, wie zum Beispiel Urlaubsreisen oder Wochenendtrips angesehen. Alternative Mobilitätsoptionen für "lange Reisen" sind daher notwendig, um die Akzeptanz für elektrische Fahrzeuge zu fördern.

### 8.3. Ergebnisse aus der Studie in Polen

Bei unseren diskreten Entscheidungsexperimenten wählen die Befragten ihr bevorzugtes Auto aus unseren vier Typen von Autos (konventionell, elektrisch, Hybridfahrzeug oder Plugin-Hybridfahrzeug), welche mit einem Satz von sechs Attributen beschrieben werden. Die Autos unterscheiden sich voneinander durch die Stufen der verschiedenen Attribute. Der Anschaffungspreis ist einer dieser Attribute, welcher uns ermöglicht, die Grenzbereitschaft zur Zahlung für ein spezifisches Attribut eines Fahrzeugs auszuwerten. Neben dem Preis sind die weiteren Attribute: Betriebs- und Kraftstoffkosten, Reichweite, Nachtank-/Aufladezeit, Verfügbarkeit einer schnellen Auflade-Infrastruktur und zusätzliche Vorteile, wie kostenloses Parken, kostenloser, öffentlicher Transport.

Ein Quotenauswahlverfahren wurde angewandt, um ein repräsentatives Beispiel der erwachsenen, polnischen Bevölkerung in Hinsicht auf verschiedene sozio-demografische Merkmale (853 Befragte) und ein Beispiel von denen, die vorhaben, sich in den nächsten drei Jahren ein Auto zu kaufen (1760 Befragte) auszulosen. Die Umfrage nahm Gestalt in Form von strukturierten, computergestützten Web-Interviews mittels eines e-Panels an, welches von Millwardbrown, Polen, gut verwaltet wurde. Es wurden insgesamt 2613 polnische Einwohner befragt. Die Umfrage ist die erste über dieses Thema und verwendet die genannte Präferenzmethode in Polen und in Mittel- und Osteuropa.

#### **Identifikation von Auslösern und Hindernissen beim Kauf von kohlenstoffarmen Fahrzeugen und Car-Sharing in Polen**

- Die meisten Menschen, die vorhaben, innerhalb von 10 Jahren ein Fahrzeug zu kaufen, haben bereits von elektrischen Fahrzeugen oder Hybridfahrzeugen gehört (87% oder 83%), jedoch sind Hybridfahrzeuge mit Stecker (Plugin-Hybridfahrzeuge) weniger bekannt (64%).
- Nur 27% der Verbraucher haben je in Betracht gezogen, ein elektrisch betriebenes Fahrzeug zu kaufen, die meisten davon dachten an Hybridfahrzeuge und danach an Hybridfahrzeuge mit Stecker (33% und 29%).
- Unter den derzeitigen Bedingungen – und es wurden vorher detaillierte Informationen über Fahrzeuge mit alternativen Kraftstoffen an die Befragten verteilt – informierte uns nur ein kleiner Teil der Befragten über ihre Pläne, ein alternatives Fahrzeug zu kaufen (5% CNG, und 2% elektrisch oder Hybridfahrzeug).
- Der engeren Auswahl, als bei den konventionellen Fahrzeugen, mangelt es an Wartungsstationen und es besteht eine schlechtere Verfügbarkeit von öffentlichen Ladestationen in Polen, welche als wichtige Hinderungsgründe für einen Kauf eines Elektrofahrzeugs genannt werden. Elektrofahrzeuge werden desweiteren allgemein als weniger lärmend empfunden. Die Menschen neigen dazu zu denken, dass wenn sie ein elektrisches Fahrzeug kaufen, sie zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Luftverschmutzung in Großstädten und Kleinstädten beitragen. Dennoch sind diese Vorteile der elektrischen Fahrzeuge nicht unter den wichtigsten Faktoren bei der Kaufentscheidung

für ein Auto. Die entscheidenderen Faktoren für die Wahl eines Autos sind eher die geringe Ausfallrate, die Sicherheit des Autos, die Kraftstoffeffizienz, Wartungs- und Benzinkosten, Autoausstattung, Innenraum und der Anschaffungspreis.

- Ungefähr ein Viertel unserer Befragten haben schon mal von Car-Sharing oder Car-Pooling-Systemen (gemeinsame Nutzung eines Autos) gehört, und der größere Anteil von ihnen hat eher das erste statt das letztere System genutzt. Die Senkung der Kosten bei einem Car-Sharing, zum Beispiel, durch Anbieten eines Steuerrabatts auf Benzin oder Elektrizität, welche für das Betanken/Wiederaufladen des Autos verwendet wird, könnte die polnischen Reisenden dazu motivieren, dieses System noch häufiger zu benutzen. Als ein Ergebnis unseres Kontingent-Szenarios, stellten wir fest, dass das Car-Sharing-System mit Hilfe von EVs nur potentiell häufiger genutzt zu werden scheint, als das System, das sich bloß auf konventionelle Fahrzeuge verlässt.
- Die oben gelieferten Ergebnisse basieren auf eine repräsentative Probe aus der polnischen, erwachsenen Bevölkerung.

### **Abschätzung der Bereitschaft zu zahlen bei den polnischen Verbrauchern für Hybrid-, Plugin-Hybrid- und Elektrofahrzeuge**

- Wir baten die Befragten, sich vorzustellen, dass ein öffentliches Programm vorgestellt wird und langsame Ladesteckdosen mit Stromzählern, welche das Wiederaufladen eines elektrischen oder Plugin-Hybrid-Fahrzeugs ermöglichen würden, an Orten installiert werden würden, an denen sie normalerweise ihr Auto abstellten, selbst wenn sie keine Garage besitzen. Unter diesen Voraussetzungen waren die Präferenzen der polnischen Verbraucher für Hybrid- und elektrische Fahrzeuge immer noch wesentlich geringer als ihre Präferenzen für ein konventionelles Auto. Die Befragten wollten eher Plugin-Hybrid-Fahrzeuge als Hybrid-Fahrzeuge kaufen und erachteten Elektrofahrzeuge als am andersartigsten (ungünstig) im Vergleich zu konventionellen Autos. Wir vermerken jedoch, dass eine erhebliche Präferenz-Heterogenität in Hinsicht auf diese Automarken besteht, und ein erheblicher Anteil der Bevölkerung eher positive Präferenzen für die Fahrzeuge mit alternativen Kraftstoffen hegte.
- Wir werteten sowohl ein einfaches, multinominales Logit-Modell, als auch ein gemischtes Logit-Modell aus, welches besser dazu geeignet ist, die unbeobachtete Heterogenität der Befragten zu berücksichtigen, d.h. es setzt nicht voraus, dass jeder Befragte genau dieselben Präferenzen hat. In der Zusammenfassung melden wir Ergebnisse für das gemischte Logit-Modell, welches ausgewertet wurde für drei Segmente von Haushalten, welche danach definiert wurden, welche Art von Auto sie planen zu kaufen (ein neues Auto, ein gebrauchtes Auto oder noch unentschieden). Zusammengefasste Daten aus beiden Beispielen werden verwendet; es antworteten nur die Befragten, die planten, ein Auto zu kaufen.
- Die Reichweite ist eine wichtige Eigenschaft eines PKWs, welches die polnischen Verbraucher kaufen wollten. Durchschnittlich sind die polnischen Fahrer bereit, ungefähr 1,500 zł für jede zusätzliche 100 Km Reichweite zu bezahlen. Fahrer, die vorhatten ein Auto aus zweiter Hand zu kaufen, schätzen die Reichweite weniger stark wert, als Verbraucher, die vorhatten, sich ein neues Auto zu kaufen.
- Die Wiederaufladezeit und die Verfügbarkeit von Schnellladestationen sind derzeit die wichtigsten Hindernisse für eine größere Verbreitung von Elektro- und Plugin-Hybridfahrzeugen. Durchschnittlich sind die polnischen Fahrer bereit etwas weniger als 1,000 zł für jede ersparte Stunde der Wiederaufladung zu zahlen. Diejenigen, die vorhaben, sich ein neues Auto zu kaufen, sind be-

reit doppelt so viel zu bezahlen, als Käufer von Gebrauchtwagen. Die Präferenzen für Fahrzeuge mit alternativen Kraftstoffen (AFVs) stiegen deutlich an, als sich die Verfügbarkeit von Schnellladestationen von einer geringen Stufe (20% der Tankstellen + an wenigen öffentlichen Plätzen) auf eine mittlere Stufe (60% der Tankstellen + an der Hälfte der öffentlichen Plätze) oder sogar auf eine hohe Stufe (90% der Tankstellen + an fast allen öffentlichen Plätzen) verbesserte. Die entsprechende Bereitschaft, für eine mittlere oder hohe Verfügbarkeit einer Schnelllade-Infrastruktur zu bezahlen, liegt bei ungefähr 5,600 zł und entsprechend 8,600 zł

**Abbildung 19: Auswertungsergebnisse – Gemischtes Logit-Modell für drei Haushaltssegmente, WTP-Platz**

	Neues Auto	Gebrauchtes Auto	unentschieden	Zusammengefasste Daten
HV	-19 750 zł	-13 469 zł	-12 054 zł	- 17 116 zł
PV	-9 643 zł	-10 807 zł	-8 898 zł	- 12 726 zł
EV	-29 251 zł	-17 651 zł	-29 727 zł	- 26 272 zł
Betriebskosten	-48 408 zł	-24 021 zł	-44 224 zł	- 381 zł
Reichweite (in 100km)	1 418 zł	1 145 zł	1 344 zł	1 522 zł
Aufladezeit (in Stunden)	-1 080 zł	-524 zł	-1 250 zł	- 940 zł
Kostenlose, öffentliche Verkehrsmittel	1 705 zł	1 010 zł	622 zł	1 387 zł
Kostenloses Parken	3 043 zł	1 887 zł	2 420 zł	2 298 zł
Schnelle Auflade-Infrastruktur – mittlere Verfügbarkeit	6 666 zł	4 728 zł	6 137 zł	5 562 zł
Schnelle Auflade-Infrastruktur – hohe Verfügbarkeit	7 507 zł	6 105 zł	12 235 zł	8 579 zł

Anmerkung: Alle Koeffizienten stehen wesentlich auf der 1%-Stufe, außer den Koeffizienten für den kostenlosen, öffentlichen Transport, der wesentlich auf der 5%-Stufe (neues Auto) oder unwesentlich auf einer bequemen Stufe (unentschlossen) steht.

- Das Anbieten weiterer Vorteile, wie zum Beispiel kostenloses Parken und kostenloser, öffentlicher Transport, erhöht die Wahrscheinlichkeit, sich für AFVs zu entscheiden. Der durchschnittliche WTP beträgt 2,300 zł und 1,400 zł, und wieder sind die Käufer von Neuwagen bereit mehr zu zahlen, als die Käufer von Gebrauchtwagen.
- Die Ergebnisse der gemischten Logit-Modelle deuten an, dass die Verbraucherpräferenzen für AFVs und deren Eigenschaften stark verschieden sind. Ein Wechselwirkungsmodell offenbart, dass ein höheres Einkommen die Wahrscheinlichkeit erhöht, ein Hybridfahrzeug (HV) oder ein Plugin-Hybridfahrzeug (PHEV) zu kaufen, und schwächt die Auswirkung des Merkmals Betriebskosten ab. Die Auswirkung des Einkommens auf andere Eigenschaften scheint unerheblich zu sein. Mindestens ein Kind in der Familie zu haben, senkt die Wichtigkeit anderer Vorzüge (öffentlicher Transport und Parken).

- Die Motorgröße bei größeren Fahrzeugen senkt die Wahrscheinlichkeit, ein Elektrofahrzeug (EV) zu kaufen, und senkt allgemein den WTP-Wert für alle Fahrzeugeigenschaften aufgrund der Senkung des Koeffizienten beim Anschaffungspreis (Grenznutzen des Einkommens). Eine größere Motorgröße erhöht die Wichtigkeit der Reichweite beim Fahren, der Wiederaufladezeit und des kostenlosen Parkens. Je mehr Kilometer ein Fahrer erwartet zu fahren, umso höher der WTP für Hybridfahrzeuge (HVs) und Plugin-Hybridfahrzeuge (PHEVs), und umso geringer der WTP für Elektrofahrzeuge. Und je mehr Kilometer der Befragte vorhat zu fahren, umso wichtiger sind die Anschaffungskosten. Auf der anderen Seite führt häufigeres Fahren dazu, den Anschaffungspreis weniger zu berücksichtigen.
- Mit Hilfe der Schätzergebnisse und des Simulierens der Auswirkung auf den Anschaffungspreis, und der Betriebskosten auf die Wahrscheinlichkeit ein spezifisches Fahrzeug auszuwählen, wurden die Preiselastizitäten für verschiedene Haushaltssegmente abgeleitet.
- Wir haben herausgefunden, dass weniger gebildete Befragte sensibel in Bezug auf den Anschaffungspreis eines konventionellen Fahrzeugs sind, während diese Elastizität den geringsten Wert unter den gebildeteren Befragten hatte, die eher auf Preisänderungen bei EVs, gefolgt von Preisänderungen bei HVs, reagierten. Durchschnittlich wird die höchste Preiselastizität für Preisänderungen bei EVs geschätzt, besonders bei Haushalten mit Standort in einem ländlichen oder vorstädtischen Gebiet.
- In Hinsicht auf die Betriebskosten sind weniger gebildete Befragte fast unempfindlich gegen Kostenänderungen. Wieder wird die größte Elastizität in Bezug auf die Betriebskosten für Elektrofahrzeuge (EVs) ausgewertet. Befragte, die in einem ländlichen Gebiet leben, sind dann sensibler gegenüber Kostenänderungen, als die Befragten, die in vorstädtischen und ländlichen Gebieten leben. Diese Ergebnisse halten außerdem Veränderungen bei den Betriebskosten auf unteren Ebenen bereit, die eher die Kraftstoffkosten widerspiegeln.

## Literatur

Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure. Text with EEA relevance.

---

AutorInnen: DEFINE Konsortium

Titel: Synthesebericht DEFINE

Projektbericht/Research Report

© 2014 Institute for Advanced Studies (IHS) und das DEFINE Konsortium

Stumpergasse 56, A-1060 Vienna • ☎ +43 1 59991-0 • Fax +43 1 59991-555 • <http://www.ihs.ac.at>

---