



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 6. Dezember 2010

Auswirkungen der Markteinführung von Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybrids auf die Energieträger und das Elektrizitätsnetz

Bericht

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Netze
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

ewz
Elektrizitätswerk der Stadt Zürich
Tramstrasse 35
8050 Zürich

Auftragnehmer:

ENCO AG
Munzachstrasse 4
CH-4410 Liestal
www.enco-ag.ch

Pierre Strub – nachhaltig wirkt
Horburgstrasse 22
CH-4057 Basel
www.pierrestrub.ch

Beratende Begleitgruppe:

Rainer Bacher, Bacher Energie AG, Experte
WWF Schweiz, Patrick Hofstetter, Ulrike Saul
Schweizerische Energiestiftung SES, Bernhard Piller
Energiewirtschaftliches Institut EWI Köln, Frieder Borggrefe

Autoren:

Reto Rigassi, ENCO AG, reto.rigassi@enco-ag.ch
Pierre Strub, info@pierrestrub.ch
Stefanie Huber, ENCO AG, stefanie.huber@enco-ag.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500135-01 / SI/500135

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Résumée	5
Summary.....	6
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage	8
1.2 Zielsetzung.....	8
2 Methodik.....	9
3 Datengrundlagen und Annahmen	12
3.1 Die wichtigsten Annahmen im Überblick.....	12
3.2 Fahrzeuge: Verbreitung, Technologie und Nutzung	12
3.3 Elektrizitätsnetz.....	16
3.4 Weitere Datengrundlagen und Annahmen.....	20
4 Ergebnisse	21
4.1 Einzelfahrzeuge	21
4.2 Gesamte Fahrzeugflotte	24
4.3 Potential für Bereitstellung von Regelfunktionen in der Schweiz.....	25
4.4 Ökologische Auswirkungen der Regelfunktion im europäischen Kontext.....	27
5 Relation zu Szenarien.....	32
5.1 Energieperspektiven 2035	32
5.2 2000 Watt-Gesellschaft.....	32
6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	34
6.1 Schlussfolgerungen	34
6.2 Empfehlungen.....	35
6.3 Offene Fragen.....	40
7 Referenzen	41
8 Experten / Kontakte	46

Zusammenfassung

Die Einführung elektrischer Antriebe im Automobilsektor wird bis 2035 bei einem erwarteten Anteil von rund 25% elektrisch oder teilelektrisch betriebener Fahrzeuge keinen wesentlichen Mehrverbrauch an Elektrizität verursachen (3% des heutigen Verbrauchs), kann jedoch den Treibstoffverbrauch (Benzin und Diesel) um knapp einen Viertel reduzieren.

Stammt die eingesetzte Elektrizität für Elektroautos und Plug-In Hybrids aus erneuerbaren Energien, so können gleichzeitig die CO₂-Emissionen wie auch der Primärenergiebedarf deutlich reduziert werden. Wird Elektrizität aus Gaskombikraftwerken eingesetzt, resultiert ebenfalls eine Reduktion von CO₂-Emissionen und Primärenergiebedarf, allerdings in deutlich geringerem Umfang. Mit Strom aus Kernkraftwerken reduzieren sich die zwar die CO₂-Emissionen massiv, jedoch muss dafür ein erhöhter Primärenergiebedarf in Kauf genommen werden. Elektroautos und Plug-In Hybrid Autos, welche mit Strom aus Öl- und Kohlekraftwerken betrieben werden, erreichen nicht die Performance von herkömmlichen benzin- oder dieselbetriebenen Autos. Ob ein verstärkter Einsatz elektrischer Antriebe im Automobilsektor aus energie- und klimapolitischer Sicht Sinn macht, hängt somit entscheidend von der Herkunft der eingesetzten Elektrizität ab.

Die Speicherfunktion der Batterien in den Elektrofahrzeugen kann zusätzlich genutzt werden, um hohe Anteile an stochastisch anfallender Wind- oder Solarenergie im Elektrizitätsnetz zu integrieren. Dies kann geschehen, indem entweder der Ladezeitpunkt auf die Leistungsprognosen abgestimmt wird oder indem Regelleistung für unvorhersehbare Schwankungen bereit gestellt wird. Im letzteren Fall kann bis 2035 mehr als die heute vorhandene Regelleistungsreserve bereit gestellt werden. Wird international Regelleistung aus fossilen Kraftwerken substituiert, resultieren weitere bedeutende Einsparungen an CO₂ und Primärenergie.

Die Nutzung der Potenziale hängt von einer nachhaltigen Marktentwicklung der Elektromobilität und von Smart Grids ab. Günstige Rahmenbedingungen in den Bereichen angewandte Forschung, Technologieförderung und Förderung von Produkten in der Markteinführung sind dafür wesentlich. Zu erwarten ist aber auch, dass sich die Verbrauchswerte konventionell betriebener Autos wesentlich verringern, sodass ein Wettbewerb zwischen Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebskonzepten zu erwarten ist.

Résumée

D'ici à 2035, il est prévu que la part de véhicules électriques ou en partie électriques s'élève à environ 25%. L'utilisation accrue de moteurs électriques dans le secteur automobile ne causera pas d'augmentation significative de la consommation d'électricité (3% de la consommation actuelle) mais permettra de réduire de près d'un quart la consommation de carburant (essence et diesel).

Si l'électricité utilisée pour les voitures électriques et hybrides rechargeables provient d'énergies renouvelables, les émissions de CO₂ et les besoins en énergie primaire peuvent être simultanément réduits considérablement. Si l'électricité est produite par des centrales à gaz à cycle combiné, cela se traduit également par une réduction des émissions de CO₂ et des besoins en énergie primaire, mais dans une bien plus faible mesure. Avec l'électricité provenant de centrales nucléaires, les émissions de CO₂ sont certes fortement réduites, mais les besoins en énergie primaire sont plus élevés. Les véhicules électriques et hybrides rechargeables qui sont alimentés par l'électricité provenant de centrales à pétrole ou à charbon n'atteignent pas les performances des voitures traditionnelles à essence ou à moteur diesel. Le recours plus large aux moteurs électriques dans le secteur automobile fait-il sens dans le cadre d'une politique énergétique et climatique durable? L'origine de l'électricité utilisée est un argument crucial dans ce choix.

Dans le futur, les besoins de réglage du réseau électrique vont augmenter pour intégrer une part plus élevée d'énergie éolienne ou solaire, produite de manière stochastique. La capacité de stockage des batteries des véhicules électriques pourra être utilisée comme outil de réglage. Cela peut être fait soit en ajustant le temps de chargement aux pronostics de performance, soit en mettant à disposition une réserve de puissance pour des variations imprévisibles. Dans ce deuxième cas, il est possible, d'ici à 2035, de mettre à disposition plus que la réserve de puissance disponible à l'heure actuelle. Si la réserve de puissance remplace des centrales à combustibles fossiles au niveau international, il en résultera d'autres réductions significatives d'émissions de CO₂ et de besoins en énergie primaire.

L'expression des potentiels dépend d'une évolution durable sur le marché des véhicules électriques et des réseaux de distribution d'électricité Smart Grids. Des conditions favorables dans les domaines de la recherche appliquée, du développement technologique et de la promotion de produits sont donc essentielles lors de la commercialisation. Il faut toutefois également prévoir que la valeur de consommation des véhicules à propulsion va diminuer, de sorte que l'on peut s'attendre à une concurrence entre les véhicules avec différents types de moteurs.

Summary

The introduction of electric drives in the automobile sector will, for an expected percentage of around 25% of all vehicles being wholly or partly electrically powered by 2035, cause no important additional consumption of electricity (3% of today's consumption); fuel consumption (petrol and diesel) can, however, be reduced by almost a quarter.

If the power used for electrically-powered road vehicles and plug-in hybrids is produced from renewable sources of energy, CO₂ emissions and primary energy requirements can also be significantly reduced at the same time. If power from gas-fired combined heat and power installations is used, a reduction of CO₂ emissions and primary energy requirements can also be made - although to a much smaller degree, however. With power from nuclear power plants, CO₂ emissions can indeed be massively reduced, although increased primary energy requirements must be taken into account, however. Electrically powered road vehicles and plug-in hybrid cars which are powered by electricity from oil-fired and coal-fired power stations do not achieve the performance of traditional petrol or diesel powered cars. This means that, from the energy and climate-protection point of view, the answer to the question if the increased use of electric drives in the automobile industry is sensible or not depends decisively on the origin of the electricity used.

The energy storage function of the batteries in electric vehicles can additionally be used to help integrate the high proportion of stochastically generated wind and solar power in the power grid. This can be done by either synchronising the point in time for battery charging with load profile forecasts or by providing standby power in order to balance out unforeseeable power variations in the grid. In the latter case, a larger reserve capacity than that available today can be made readily available by 2035. If balancing power from fossil-fuel powered generating facilities is substituted on an international basis, further important savings in CO₂ emissions and primary energy consumption will result.

The use of this potential is dependent on sustainable market trends in the electrically-powered mobility area and the development of Smart Grids. Here, favourable factors in the applied research and technology promotion areas are essential, as is the promotion and launching of products in the market. It is to be expected, however, that the fuel consumption of conventionally powered cars will also be reduced to a great extent, so that competition between vehicles with various drive concepts is to be expected.

Vorbemerkung

Die Studie besteht aus einem Bericht und den Ergänzungen, welche als separate Dokumente vorliegen.

Im Bericht werden sowohl die wesentlichen Punkte der eingesetzten Methodik sowie der verwendeten Datengrundlagen und Annahmen wie auch die zentralen Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Er ist als in sich geschlossener Bericht nutzbar.

In den Ergänzungen werden Details bezüglich Methodik (inkl. Beschreibung des Berechnungsgangs), Datengrundlagen, Annahmen und Ergebnissen dargestellt. Die Ergänzungen dienen der Nachvollziehbarkeit der erreichten Ergebnisse. Sie sind gleich strukturiert wie der Bericht.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Heutige Hybridfahrzeuge weisen wie Elektrofahrzeuge (Electric Vehicles = EV) gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor niedrigere Energieverbrauchswerte auf und haben deshalb im Rahmen der aktuellen Energie- und Klimadiskussionen eine grosse Bedeutung erlangt. Während beispielsweise die CO₂-Emissionen der Haushalte oder der Wirtschaft einen neutralen oder leicht sinkenden Trend aufweisen, steigen die Treibstoffemissionen des Strassenverkehrs immer noch an [BAFU, 2010]. Dies macht neue Ansätze im Bereich Mobilität nötig.

Da für das Nachladen der Batterien häufig eine gewisse zeitliche Flexibilität besteht und die Batterien während des Parkierens zur Bereitstellung von Regelenergie genutzt werden können, sind weitere Vorteile durch sogenannte Plug-In-Hybrid Vehicles (PHEV) und EV bei einer weiter verstärkten Nutzung von Solar- und Windenergie möglich. So zeigt z.B. die Vorstudie "Integration von Plug-in-Hybrid Cars zur Förderung intelligenter Verteilnetzstrukturen" [Horbaty & Rigassi, 2008] erhebliche Potenziale von Fahrzeugbatterien für die Deckung des zukünftigen Regelenergiebedarfs.

Während die Vorteile von PHEV und EV für die Energieversorgung potenzielle Vorteile aufweisen, gibt es bei den möglichen ökologischen Auswirkungen zahlreiche Varianten.

1.2 Zielsetzung

Mit der vorliegenden Studie werden die folgenden Ziele verfolgt:

- Energiebedarf und CO₂-Emissionen von PHEV und EV im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor werden sowohl für Einzelfahrzeuge wie auch für die gesamte Personewagenflotte analysiert und diskutiert.
- Die möglichen Auswirkungen durch die Bereitstellung von Regelenergie mit PHEV resp. EV werden untersucht.
- Die vorgenannten Punkte werden ausgehend vom aktuellen Stand bis zum Jahr 2035 analysiert. Für die langfristigen Perspektiven wird die Kompatibilität von PHEV resp. EV mit der 2000-Watt-Gesellschaft diskutiert.
- Entsprechend den Ergebnissen werden Empfehlungen bezüglich der Strategieentwicklungen für Energieversorger, politische Behörden sowie NGO's formuliert.

2 Methodik

Basisdaten

Die vorliegende Arbeit basiert im wesentlichen auf der Auswertung bereits bestehender Grundlagen der relevanten Bereiche Plug-In-Hybrids (PHEV), Electric Vehicles (EV), konventionelle Fahrzeuge und Elektrizitätsversorgung. Berücksichtigt werden nationale und internationale Forschungsarbeiten, Pilotprojekte und Firmenaktivitäten.

Energie- und CO₂-Bilanzierung

Die Energie- und CO₂-Bilanzierung geschieht auf zwei unterschiedlichen Stufen (siehe Abbildung 1):

Endenergie resp. "Tank-to-Wheel":

Betrachtungsgrenze ist der Energiebezug des Fahrzeugs (über Tank oder Steckdose)

Primärenergie resp. "Well-to-Wheel":

Globale Betrachtung inkl. vorgelagerter Prozesse zur Stromerzeugung / Treibstoffaufbereitung, z.B. Raffinerie, Kohleabbau/transport

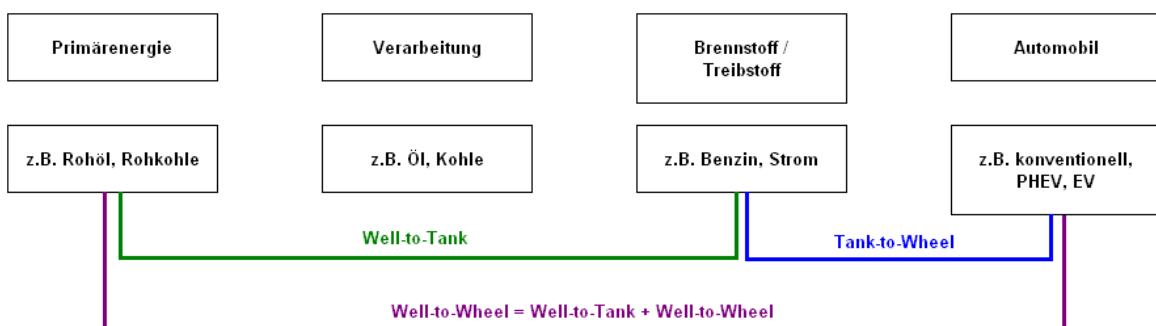


Abbildung 1: Darstellung der Begriffe "Well-to-Wheel" und "Tank-to-Wheel". Nach [Alpiq, 2009]

Die graue Energie zur Herstellung der unterschiedlichen Fahrzeugtypen wird insofern berücksichtigt, dass die Energie zur Batterieherstellung als zusätzlicher Aufwand gegenüber konventionellen Fahrzeugen eingerechnet wird.

Zeithorizont

Der Zeithorizont der vorliegenden Untersuchungen erstreckt sich in Anlehnung an die Energieperspektiven des Bundes [BFE, 2007] bis maximal ins Jahr 2035.

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist der Zeitpunkt der Markteinführung der Fahrzeuge (2015), wobei sich die Eigenschaften der Fahrzeuge und die Rahmenbedingungen gegenüber heute kaum verändert haben. Deshalb wird in den Graphiken die Bezeichnung 2010/2015 verwendet.

Batterienutzung

Für die vorliegende Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeugbatterien mit Fahrplanenergie zu einem optimierten Zeitpunkt geladen werden und ihre Kapazität zusätzlich in einem gewissen Rahmen für Regelfunktionen (d.h. Bereitstellung von Regelleistung und –energie) eingesetzt werden kann. Dies kann deshalb interessant sein, weil die Batterien durch die Bereitstellung von Regelleistung relativ wenig bean-

sprucht (resp. Be- oder Entladen) werden. Bei Tertiärregelung wird beispielsweise in ca. 90 % der Zeit keine Regelenergie benötigt [eigene Berechnungen].

Demgegenüber sind die Kosten für den Einsatz von Batterien als Speicher auf absehbare Zeit noch zu hoch, um bereits jetzt wirtschaftlich Strom in Niedertarifzeiten aufzunehmen und in Hochtarifzeiten abzugeben. In der vorliegenden Arbeit wurde ein mehrfaches Be- und Entladen während des Parkierens, womit die Batterie als Speicher eingesetzt würde, nicht berücksichtigt.

Diese Abschätzung basiert auf der durchschnittlichen Differenz Nieder-/Hochtarifzeiten an der deutschen Strombörse [EEX, 2009] und den Kosten für das Be- und Entladen der Fahrzeugbatterien durch die damit verbundene Abnahme der Lebensdauer, basierend auf [Kamath, 2009; Borggreve et al., 2008; AEE, 2009; Valentine-Urbschat & Bernhart, 2009; Löser et al., 2009; Asendorpf, 2009]. Steigt die Lebensdauer der Batterien oder die Differenz zwischen Hoch- und Niedertarifen stark, so muss die Speicherfunktion neu betrachtet werden.

Bewertung Fahrplan- und Regelenergie

Die Auswirkungen von PHEV resp. EV hängen ganz entscheidend davon ab, wie die vom Netz bezogene Elektrizität (Fahrplanenergie) erzeugt worden ist resp. welche Art der Regelenergie im Netz substituiert wird. Die Begriffe Fahrplan-, Regel- und Ausgleichsenergie werden für die vorliegende Studie folgendermassen verwendet:

- Als Fahrplanenergie für PHEV und EV wird jene Strommenge bezeichnet, welche die Fahrzeuge vom Netz als Antriebsenergie - also quasi als Treibstoff - beziehen. Dieser Strombezug wird über die Bilanzgruppe in deren Fahrplan berücksichtigt. Die Qualität des Stroms (erneuerbar / aus fossilen Kraftwerken) ist damit nicht bezeichnet.
- Regelleistung wird abgerufen, wenn in der momentanen Leistungsbilanz einer Regelzone die Summe der tatsächlichen Leistungen aller Einspeisungen und Entnahmen von der Summe der erwarteten Leistungen gemäss Fahrplan abweicht [Swissgrid, 2008]. Um die Frequenz im elektrischen Netz stabil zu halten, müssen entsprechende Abweichungen jederzeit ausgeglichen werden. Mit der Regelfunktion der Fahrzeugbatterien wird die Teilnahme an der Regelleistungsbereitstellung resp. an der allenfalls nötigen Lieferung von Regelenergie bezeichnet.
- Ausgleichsenergie: Als Ausgleichsenergie wird jene Elektrizitätsmenge bezeichnet, welche den Bilanzgruppen vom Regelzonenbetreiber verrechnet wird als Abweichung von Import-/ Exportfahrplänen und Ein-/ Ausspeisungen [Swissgrid, 2008]. Die Bilanzgruppen sind betrebt, so wenig wie möglich Ausgleichsenergie zu beziehen, um ihre Strombezugskosten zu minimieren. Im Ergebnis-Teil wird ein Einsatz von Fahrzeugbatterien für die Minimierung der Ausgleichsenergie für eine Bilanzgruppe diskutiert.

Für die vom Netz bezogene Elektrizität werden sowohl einzelne Erzeugungstechnologien (erneuerbare Stromerzeugung, Kernkraft, fossile Kraftwerke) wie auch die folgenden Mischvarianten betrachtet:

- Schweizer Bezugsmix für 2015 (gem. Stromkennzeichnung 2007)¹
- UCTE² Erzeugungsmix für 2015 (gem. Eurostat-Daten für EU-27 für 2007)
- Schweizer Erzeugungsmix für 2020 / 2035 (gem. Energieperspektiven des Bundes, Szenario III, Variante C & E)
- UCTE Erzeugungsmix (Entwicklung bis 2035 gem. NEEDS-Projekt, Szenario "450 ppm CO₂")

¹ Zu den Quellenangaben siehe Teil "Datengrundlagen und Annahmen"

² Es wird im gesamten Dokument die Bezeichnung UCTE verwendet, obwohl die UCTE inzwischen Teil der ENTSO-e geworden ist. Die verwendeten Daten stammen jedoch noch alle aus dem alten UCTE-Raum.

- Erneuerbarer Strommix (70 % Wasserkraft, je 10 % Biogas Blockheizkraftwerk, Windkraft und Photovoltaik)

Für die substituierte Regelenergie wurden im Rahmen dieses Projektes umfassende Überlegungen ange stellt. Auch hier werden einzelne Bereitstellungstechnologien wie auch Mischvarianten für die Schweiz und die UCTE betrachtet. Mögliche Entwicklungen im Regelenergiemarkt fliessen einerseits in die Potential überlegungen ein, werden aber auch ausführlich diskutiert. Wirtschaftliche Überlegungen dazu sind nicht Gegenstand dieser Studie.

Berechnungsmodell

Die Berechnung der Ergebnisse erfolgt mit einem Excel-Berechnungstool und wird durch die folgenden Punkte charakterisiert:

Fahrzeugeigenschaften:

Die Verbrauchswerte und die Batteriekapazität werden definiert. Für PHEV wird der Verbrauch bei reinem Elektroantrieb und bei Hybridbetrieb vorgegeben.

Fahrtenmodell:

Stark vereinfachtes Fahrtenmodell mit drei typischen Fahrzyklen, welche aus den statistischen Verkehrsdaten des Mikrozensus abgeleitet werden.

Batterienutzung:

Für jeden Fahrzyklus wird davon ausgegangen, dass die Batterie entweder soweit möglich für den Antrieb eingesetzt (um einen möglichst grossen Teil der Fahrstrecke elektrisch zurückzulegen) oder für die Bereitstellung von Regelenergie genutzt wird. Die Anteile der Batterienutzungsarten können für die Fahrzyklen unterschiedlich festgelegt werden.

Infrastruktur:

Die Infrastruktur wird charakterisiert durch die maximal mögliche Entladeleistung der Netzanschlüsse sowie den Anteil der Fahrzeuge, welcher sich dauernd am Netz befindet. Letzterer Punkt kann für die einzelnen Fahrzyklen unterschiedlich festgelegt werden und hängt sowohl von den Fahrzeiten wie auch von der Verbreitung der Netzanschlüsse ab.

Beanspruchung Regelreserven:

Die Dauer, für welche die Regelreserven im Bedarfsfall effektiv Regelenergie liefern müssen, kann vorgegeben werden. Dieser Punkt ist abhängig von den Ausschreibungsbedingungen.

Berechnung der Verbrauchswerte und des möglichen Potenzials für Regelreserven:

Die Berechnung erfolgt in einem ersten Schritt für Einzelfahrzeuge und anschliessend für die gesamte Flotte in den Jahren 2015/2020/2035 sowie jeweils für die Fälle mit/ohne Bereitstellung von Regelleistung und Lieferung von Regelenergie.

3 Datengrundlagen und Annahmen

3.1 Die wichtigsten Annahmen im Überblick

- Es wird zwischen Plug-in-Hybrids (PHEV), reinen Elektrofahrzeugen (Electric Vehicles, EV) und konventionell mit Benzin angetriebenen Fahrzeugen unterschieden. Mögliche Anteile von Erdgas, Biogas, Biofuels und Brennstoffzellenfahrzeugen werden ausgeklammert.
- Die gesamte PKW-Fahrzeugflotte wächst im betrachteten Zeitraum (2010/2015 bis 2035) von 3.9 auf 4.5 Mio. Fahrzeuge, wobei der Anteil der konventionellen Fahrzeuge von 98 auf 74 % sinkt.
- Für PHEV und EV führt die Steigerung der Kapazitäten der Batterien bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung der Antriebe zu einer Steigerung der rein elektrischen Reichweite bis 2035 von 125 auf 450 km (EV) und von 44 km auf 92 km (PHEV). Die Infrastruktur entwickelt sich von 2020 bis 2035 in Bezug auf Schnellladefähigkeit und Flächen-Abdeckung.
- Bei allen Fahrzeugkategorien sinkt der Verbrauch bis 2035, bei den konventionellen Fahrzeugen bis auf 2.6 l/100km (gemäss EU-Zielwerten und Fortschreibung bis 2035).
- Wird die Regelenergiefunktion ausgeklammert, fahren PHEV so weit als möglich elektrisch. Ohne entsprechende Rahmenbedingungen werden PHEV durch die Möglichkeit des Verkaufs von Regelenergie vermehrt benzinisch gefahren.
- PHEV und EV weisen, unabhängig von der Fahrweise, gemäss heutiger Technik einen kleinen Benzinverbrauch für Heizen auf. In Zukunft wird dieser Energiebedarf durch Nutzung des Kühlkreislaufs des elektrischen Antriebs und verbesserte Isolation stark reduziert.
- Es werden drei unterschiedliche Fahrzyklen unterschieden: Kurz-, Pendler- und Langstrecken.
- Der Elektrizitätsmix für die Schweiz beruht für 2010/2015 auf der Stromkennzeichnung 2007 und stellt damit den Bezugsmix dar. Für 2020 und 2035 wird der Produktionsmix verwendet, der auf dem Szenario III, Variante C & E (zentral fossil und erneuerbar) basiert.
- Der Elektrizitätsmix für die UCTE beruht für 2010/2015 auf der Stromproduktion der EU-27 (Daten Eurostat), für 2020 und 2035 wird der Produktionsmix nach dem Szenario "450 ppm CO₂" aus dem NEEDS-Projekt verwendet.
- Der Regelenergiemix der Schweiz besteht zu über 99 % aus Wasserkraft, den Rest liefert Kernenergie (Angaben von Swissgrid). Für die UCTE wurde ein Regelenergiemix hergeleitet (Anteil Wasserkraft 35 %, Anteil fossil 63 %).
- Die Primärenergie- und CO₂-Emissionsfaktoren basieren auf einer Studie von [Frischknecht und Tuchsenschmid, 2008], die Daten der Jahre 2000 bis 2006 verwendet. Die Faktoren werden für 2020 und 2035 nicht angepasst, d.h. Wirkungsgradverbesserungen im Kraftwerkspark bleiben unberücksichtigt.
- Stellen PHEV und EV ihre Batterie für Systemdienstleistungen (Regelenergie) zur Verfügung, erhalten sie eine Verbrauchsgutschrift für die Entlastung des konventionellen Kraftwerksparks.

3.2 Fahrzeuge: Verbreitung, Technologie und Nutzung

Die herangezogenen Studien dienten zur Abgleichung der verschiedenen Technologiepfade, sie berücksichtigen die Seiten der üblichen Technologieentwicklung, Produktionszyklen in der Industrie, notwendige Investitionen, die Interaktion zwischen Produkten und Anwendern und basieren meistens auf förderlichen

politischen Rahmenbedingungen (Förderung oder Zugangsbeschränkungen für nicht emissionsfreie Fahrzeuge) und Ressourcenpreisentwicklungen, da die Markteinführung von PHEV und EV heute als common sense angesehen wird. Dabei werden in der Regel die Fahrzeugzahlen, deren Eigenschaften sowie Nutzung und die Infrastrukturentwicklung interagierend betrachtet [Lache et al., 2008; Wietschel, 2008/9; Deutsche Bundesregierung, 2009; Duvall, 2008; Valentine-Urbschat & Bernhart, 2009; Alpiq, 2009; Schwill & Borggrefe in Borggrefe et al., 2008; Pike Research, 2009; Engel, 2008].

Anzahl Fahrzeuge im Markt

Basis für die Berechnung der Fahrzeugzahlen sind der prognostizierte steigende Gesamtbestand an PKW in der Schweiz (2015: 3.9 Mio., 2035 4.5 Mio.) [Keller, 2007] sowie internationale und nationale ausgewertete Marktstudien (siehe oben) zu kommenden %-Anteilen für PHEV resp. EV an den Gesamtflossen (Abbildung 2). Die Zahlen werden als gesunde Mittelwerte aus den Studien gewertet, entsprechen jedoch in Mitteleuropa eher einer dominanten Marktentwicklung.

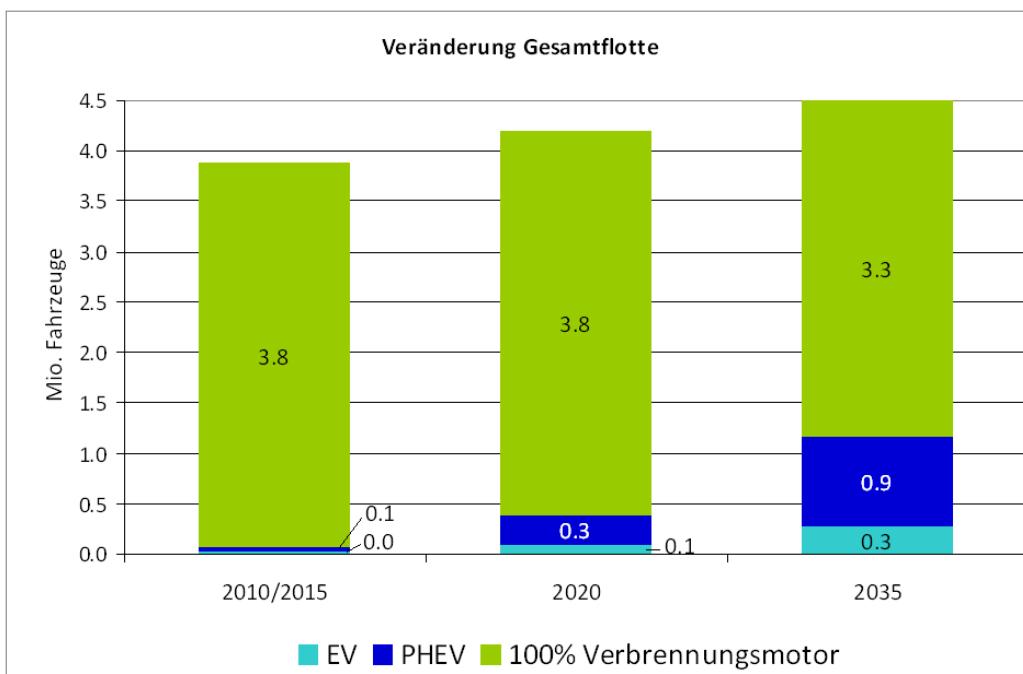


Abbildung 2: Markteinführung von EV und PHEV bis 2035 in der Schweiz

Die restlichen Fahrzeuge werden als konventionell angetrieben mit fossilen Energieträgern angenommen, es werden keine Erdgas-, Biogas-, Brennstoffzellenfahrzeuge berücksichtigt. Gleichzeitig müssen die Annahmen für die Marktpenetration von PHEV und EV in Relation zu den erwarteten Verbesserungen v.a. im Bereich des Downsizing von fossilen Antrieben bzw. der Marktdurchdringung von Hybridautos interpretiert werden, das heisst v.a. bewährte Technologien haben ihr Potenzial zur Verbrauchsreduktion noch längst nicht ausgeschöpft und sind noch für längere Zeit ökonomischer.

Fahrzeugeigenschaften

Es werden aufgrund des aktuellen oder kurzfristig erhältlichen Angebots (bis 2012) folgende unterschiedlichen Fahrzeug-Typen mit entsprechenden Eigenschaften verwendet:

Plug-In Hybrids PHEV: Fahrzeuge mit Batterien für Distanzen im statistischen Bereich von 100 % der Fahrten (also ca. 37 km elektrischer Reichweite) auf Hybridbasis (à la Toyota PHEV) und Fahrzeuge mit Range Extender (Priorität auf elektrischem Betrieb mit 50-100 km elektrischer Reichweite wie Opel Flextreme, BYD F3DM, die bei leerer Batterie mit einem benzinbetriebenen Generator weiter fahren).

Reine Elektrofahrzeuge EV: Rein elektrisch betriebene Autos wie Think EV oder Sportwagen wie Tesla Roadster oder Klein- und Kompaktwagen wie Mitsubishi iMieV, Nissan Leaf, Modelle von Mes-Dea mit Reichweiten von in der Regel 80-150 km. Besonderheiten wie die Reichweite von Tesla (mit 365 km Reichweite und mehr) werden als mittelfristige Realität angenommen (ab 2020).

Konventionelle Benzinfahrzeuge sind charakterisiert gemäss statistischem Durchschnittsverbrauch in der Schweiz (Neuwagenflotte 2008) und Zahlen von CORE, abgeglichen mit erwarteten CO₂-Emissionsgrenzwerten der EU [EU, 2009b] und IEA Prognosen (für 2020 und 2035) [IEA, 2008] bzw. den Energieszenarien des Bundes (Energieverbrauch Verkehr mit BIP hoch, Preise hoch und Klima wärmer) [Keller, 2007].

Tabelle 1 zeigt die angenommenen Verbrauchszahlen auf.

Tabelle 1: Verbrauchszahlen der verschiedenen Fahrzeugkategorien (Tank-to-Wheel)

Typ	PHEV			EV		100% Verbrennungsmotor		
	Benzin		Strom	Heizen	Strom	Heizen	Benzin	Heizen
Energie	Hybrid-Betrieb	el. Betrieb						
	[l/100km]	[kWh _{ch} /km]	[kWh _{el} /km]	[kWh _{ch} /km]	[kWh _{el} /km]	[kWh _{ch} /km]	[l/100km]	[kWh _{ch} /km]
2015	5.10	0.45	0.18	0.01	0.16	0.02	5.56	0.49
2020	4.50	0.40	0.15	0.01	0.14	0.01	4.06	0.36
2035	3.00	0.27	0.13	0.00	0.10	0.01	2.56	0.23

In Zukunft wird der Energiebedarf für Heizung bei den elektrischen Konzepten durch Nutzung des Kühlkreislaufs des elektrischen Antriebs und verbesserte Isolation stark reduziert. Graue Energie aus der Produktion wurde nicht spezifisch evaluiert, aber für die Herstellung der Batterie erhielten PHEV und EV einen Aufschlag gegenüber herkömmlichen Autos: Pro kWh Batteriekapazität wurden beim Energieverbrauch über die Lebensdauer 50 kWh für die Herstellung verrechnet [Information des BFE], der Lade- / Entladewirkungsgrad wurde auf 85 % festgelegt.

Batterieeigenschaften und Nutzung

Batterien haben folgende Eigenschaften (siehe dazu auch Abbildung 3):

PHEV haben eine Streuung der Kapazität von heute 5-16 kWh_{el}.

EV: Kleine 4-Plätzer und etwas grössere Fahrzeuge (angekündigt und vorhanden) haben Kapazitäten von 15 – 24 kWh_{el}. Spezifikationen wie beim Tesla (55 kWh_{el}) und angekündigter e6 von BYD (70 kWh_{el}) werden breit im Markt erst ab 2020 angenommen (auch abgestimmt auf die japanische Roadmap für PHEV und EV [BSTD, 2008]).

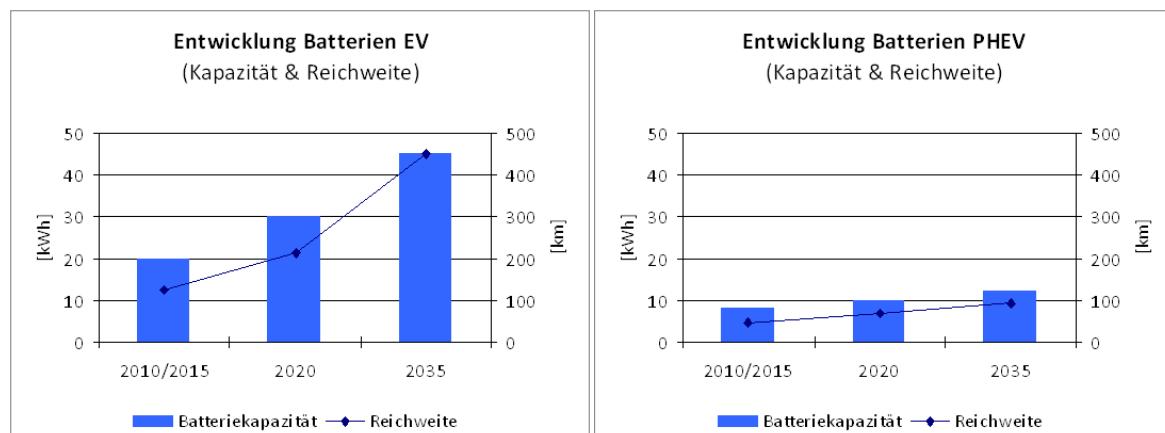


Abbildung 3: Entwicklung von Kapazität und Reichweite der Batterien

Es wird davon ausgegangen, dass Fahrzeuge primär der Mobilität dienen und die Batterien / Energiemanagementsysteme erst sekundär Eigenschaften zur Speicherung, Lastgangregelung und Regelenergielieferung entwickeln, d.h. erst in der ferner Zukunft (2020ff).

Infrastruktur

Die Infrastruktur breitet sich vom Eigenheim über Flottenparkplätze und andere Parkplätze aus, die Schnelladefähigkeit der Infrastruktur wird sich über die Zeit v.a. ab 2020 ausdehnen können. Es wird davon ausgegangen, dass die Interaktion von Netzbelaistung und Schnellladung entsprechende Technologien und Dienstleistungsmodelle hervorbringt, welche die Markteinführung einer ausgedehnten Infrastruktur ermöglichen:

2015: heute Einfachsteckdose Haushalt/Alltag bzw. Flottenstandorte, Batterien und -management mit wenig Schnelladefähigkeit, nur Eigenheimbesitzer bzw. deren Hausanschlüsse gezählt (Wohneigentumsquote 30 %) [BFS, 2007].

2020: Schnelladefähigkeit Infrastruktur tritt in den Markt ein, entsprechende Batterien im Markt eingeführt und konventionelle Einfachdosen Haushalt/Alltag bzw. Flottenstandorte werden durch zusätzliche Abdeckung wie am Arbeitsplatz ausser Haus ergänzt (40 % der möglichen Abdeckung von Standorten parkierter Autos).

2035: Weitere Marktdurchdringung der Infrastruktur auf 75 % der möglichen Abdeckung von Standorten parkierter Autos mit einem Anteil von bis zu 35 % für Schnellladung.

Nutzung

Es können auf Basis des Mikrozensus [BFS, 2007] drei unterschiedliche Tageszyklen zugrunde gelegt werden, mit entsprechender statistischer Häufigkeit (siehe dazu auch Abbildung 4):

Kurzfahrten-Zyklus (bis 5 km) immer elektrisch³: Die Fahrzeuge werden mehrere Male am Tag für kurze Strecken bewegt und PHEV kaum im Benzinmodus gefahren, da die Batterie immer genügend geladen ist und nur Geschwindigkeiten bis 80 km/h erreicht werden. Dazu gehören typischerweise Stadt Fahrten, Einkaufsfahrten, Fahrten zum öV-Knotenpunkt.

Mittlerer Zyklus (5 bis 20 km) immer elektrisch³: Die Fahrzeuge werden mehrere Male am Tag für Strecken mittlerer Distanz bewegt und PHEV kaum bis wenig im Benzinmodus gefahren, da die Batterie immer genügend geladen ist. Geschwindigkeiten über 80 km/h treten selten auf. Dazu gehören typischerweise Berufspendeln, Freizeit unter der Woche, Fahrten zum öV-Knotenpunkt.

Langstrecken-Zyklus (über 20 km) im Benzin/elektrischen Mix (PHEV) bzw. nur elektrisch (EV)³: Die Fahrzeuge werden wenige Male pro Tageszyklus für längere Strecken eingesetzt. Dazu gehören typischerweise Dienstfahrten, Vertriebsfahrten, Freizeit am Wochenende.

³ Vereinfachte Annahme

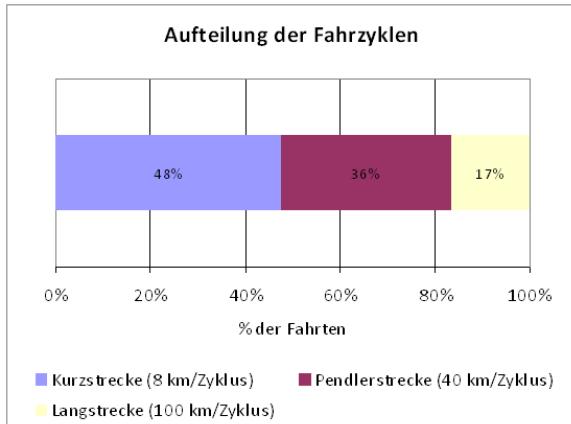


Abbildung 4: Aufteilung der Fahrzyklen

Der Anteil der sich minimal am Netz befindenden Fahrzeuge wurde unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fahrzyklen und der Infrastruktur abgeschätzt:

Statistische Stehzeit aller Fahrzeuge (über den Tagesverlauf!) 96 %, Langstrecke nur 90 % (reduzierter Betrag aufgrund der Fahrzeit für insgesamt 100 km).

Zugrunde liegt die höchst mögliche Anschlussdisziplin, d.h. wenn Infrastruktur vorhanden ist, dann wird das Fahrzeug ans Netz angeschlossen.

3.3 Elektrizitätsnetz

Stromerzeugung (Fahrplanenergie)

Um die Auswirkungen einer bestimmten Elektrizitätserzeugung zu betrachten, werden einerseits einzelne Kraftwerkstechnologien betrachtet, andererseits der Strommix der Schweiz und der UCTE sowie ein erneuerbarer Mix.

- Strommix Schweiz (Abbildung 5): Grundsätzlich interessiert der Strommix an der Steckdose, der so genannte Bezugsmix. Für heute ist dieser bekannt, wobei für 2010/2015 die Stromkennzeichnung 2007 [Schaffner, 2009] zugrunde gelegt wird. Der zukünftig angenommene Strommix entspricht dem prognostizierten Produktionsmix der Schweiz, da für den Bezugsmix keine Prognosen existieren. Es kann davon ausgegangen werden, dass der zukünftige Bezugsmix der Schweiz sich weiterhin zwischen dem Produktionsmix der Schweiz und demjenigen der UCTE bewegt. Für 2020 und 2035 werden die jeweiligen Werte aus dem Szenario III ("Neue Prioritäten") der Energieperspektiven des Bundes verwendet [BFE, 2007]. Dieses Szenario betont Klimaschutz, Energieeffizienz und Ressourcenschonung, wodurch Rahmenbedingungen geschaffen werden, die eine Einführung von PHEV und EV sinnvoll erscheinen lassen.⁴ So wird u.a. auf Einsatz der effizientesten Techniken z.B. im Fahrzeugbereich und Diffusion dieser Technologien im Zeitraum bis 2035 gesetzt. Die Variante C & E stützt sich auf fossile Grosskraftwerke und erneuerbare Energien, wobei das Potential der erneuerbaren Energie gegenüber anderen Varianten nicht vollständig ausgeschöpft wird. Dadurch können für PHEV und EV zusätzliche erneuerbare Elektrizitätsquellen erschlossen werden.
- Strommix UCTE / Europa (Abbildung 6): Da für die UCTE keine der Studie entsprechenden Prognosen verfügbar sind, wurden Daten für die EU-27 verwendet. Die Daten für 2010/2015 basieren dabei auf den Produktionsdaten aus der Eurostat-Datenbank für 2007 [Eurostat, 2008]. Als Prognose wurde

⁴ Den Autoren ist bewusst, dass gewisse Grundlagen dieser Perspektiven bereits überholt sind. So wurde u.a. eine grösitere Markteinführung von PHEV und EV nicht berücksichtigt.

das Szenario "450 ppm CO₂" aus dem NEEDS-Projekt verwendet [Cuomo et al., 2009]. In der folgenden Abbildung ist der Produktionsmix der UCTE ebenfalls aufgeführt.

- Erneuerbarer Strommix: Dieser wird aus 70 % Wasserkraft, sowie je 10 % Biogas Blockheizkraftwerk, Windkraft und Photovoltaik zusammengesetzt.

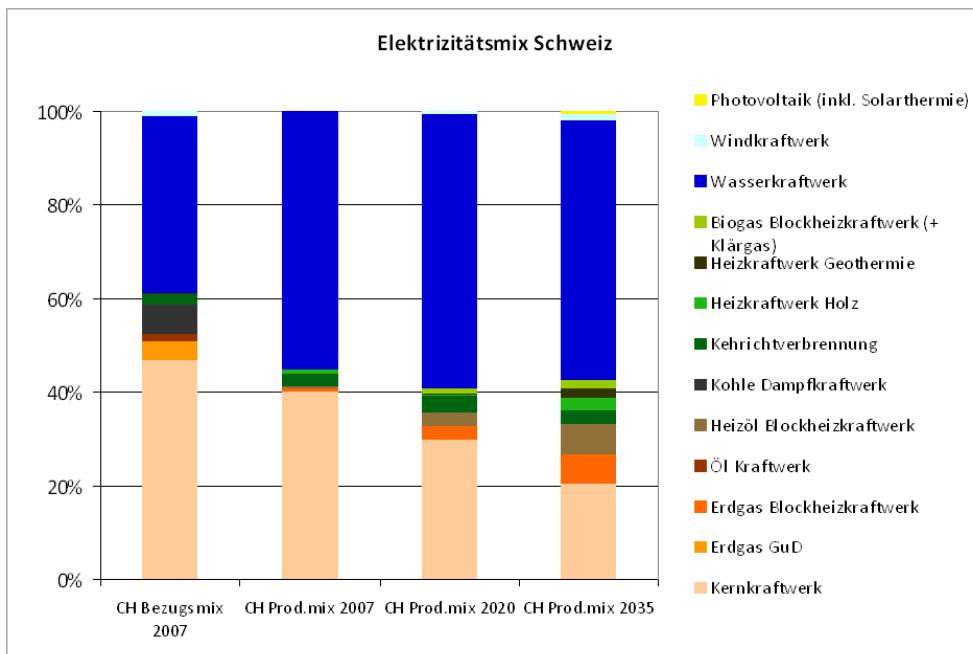


Abbildung 5: Elektrizitätsmix Schweiz 2010/2015, 2010 und 2035

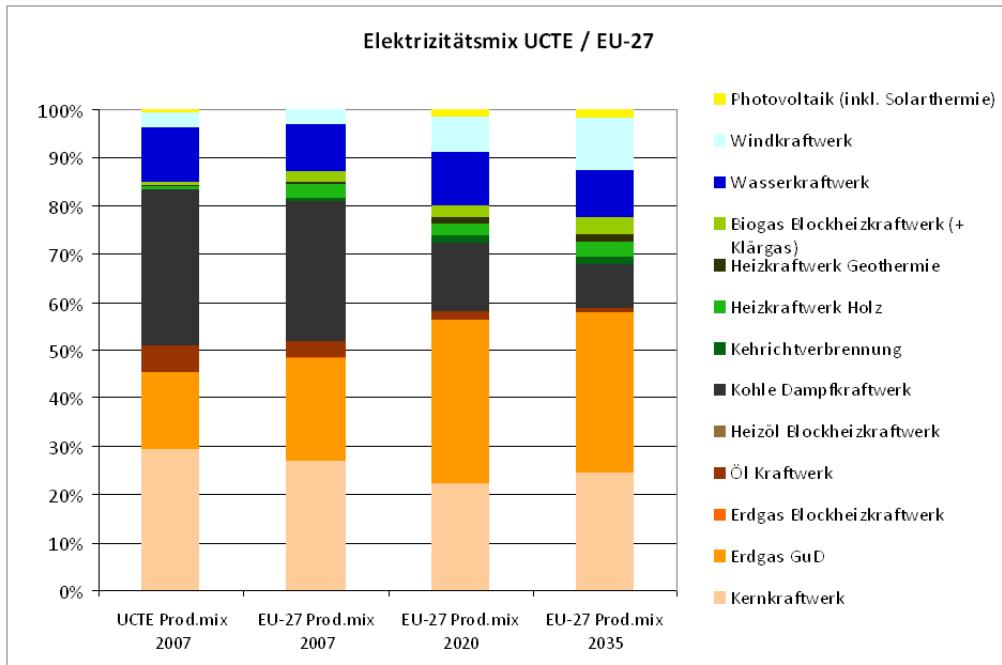


Abbildung 6: Elektrizitätsmix Europa 2010/2015, 2020 und 2035

Der Bezug des Elektrizitätsmix 2010/2015 auf die Werte von 2007 wurde gewählt, um eine solide Datengrundlage für die ersten Zahlen zu ermöglichen und um für Europa und die Schweiz das gleiche Jahr als Basis zugrunde zu legen.

Regelenergie

Für Regelkraftwerke gelten spezielle Anforderungen in Bezug auf Anfahrzeit, Verfügbarkeit u.w., so dass nur gewisse Kraftwerkstechnologien dafür eingesetzt werden können und sich der Regelenergiemix grundlegend vom gesamten Strom- oder Produktionsmix unterscheiden kann. Der Anteil der gelieferten Regelenergie an der gesamten Stromproduktionsmenge macht ca. 1 % aus [Brischke et al., 2006]; die bereitgestellte Leistung macht in der Schweiz 12 %, in Deutschland 8 % der Gesamtkapazitäten aus⁵ [eigene Berechnungen]. Ein Regelenergiemix wurde weder für die Schweiz noch eines der europäischen Länder systematisch erhoben resp. veröffentlicht, weshalb der Mix aus Gesprächen mit der Swissgrid sowie verschiedenen Quellen hergeleitet wurde (Abbildung 7).

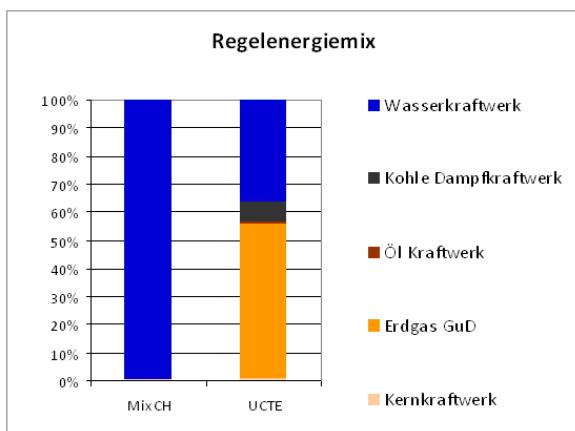


Abbildung 7: Regelenergiemix CH und UCTE, 2010/2015

Der Regelenergiemarkt wird heute noch grösstenteils nach Regelzonen getrennt bewirtschaftet. Die UCTE ermöglicht aber grenzüberschreitende Regelleistungsbereitstellung unter gewissen Voraussetzungen [UCTE, 2009]. Es sind bei der UCTE und der EU Bestrebungen im Gange, die Systemdienstleistungen zu vereinheitlichen und den Austausch zu erhöhen⁶. Parallel dazu entwickelt sich auch das Ausschreibungsverfahren, das in der Schweiz gerade erst in Betrieb genommen wurde [Beck, 2009; Thoma & Niggli, 2009]. Heute bereits möglich ist das Pooling verschiedener Erzeugungseinheiten.

Primärregelenergie wird über Regler automatisch im ganzen UCTE-Gebiet abgerufen und solidarisch getragen. Auch Sekundärregelung wird über Regler abgerufen, während bei der Tertiärregelung manuell eingriffen wird. Bei Sekundär- und Tertiärregelung hilft man sich innerhalb der UCTE bei Notwendigkeit aus, die bezogene Regelenergie wird nach Behebung des Engpasses physisch wieder ausgeglichen. [u.a. Sommer et al., 2003; Swissgrid, 2008]. Dieser Austausch wurde nicht einbezogen.

In der Schweiz wird ein Teil der Wasserkraftressourcen in Speicherwerken über Pumpspeicherung genutzt. 2008 wurden gemäss Elektrizitätsstatistik ca. 5 % der hydraulischen Stromerzeugung aus vorgängig gepumptem Wasser gewonnen [BFE, 2009]. Wird die Stromherkunft des Stroms miteinbezogen, der für

⁵ Positive und negative Regelleistung zusammengezählt, in der Schweiz werden +/- 74 MW für Primär-, +/- 350 MW für Sekundär- und +650 MW / -560 MW für Tertiärregelung vorgehalten [Swissgrid, 2008]. Die gesamte Netto-Produktionskapazität der Schweiz beträgt knapp 17'500 MW [UCTE, 2009a].

⁶ Siehe u.a. Entso-e work program [Entso-e, 2009], EU-Direktive 2009/72/EC [EU, 2009] oder EU-Verordnung No 714/2009 [EU, 2009a]

das Pumpen verwendet wird, kann sich einerseits die Zusammensetzung des Regelenergiemix Schweiz ändern, es kann sich aber auch das Ergebnis der ökologischen Auswirkungen der Regelfunktion durch Fahrzeugbatterien ändern.

Die Bereitstellung von Regelenergie durch die Nutzer von Autos wird sich an den stark gefestigten Ansprüchen der Nutzerinnen und Nutzer orientieren müssen. Sie sind in der Regel nicht bereit, ihre Ansprüche stark und rasch zu ändern, deshalb dürfen die neuen Fahrzeuge und die entsprechenden Dienstleistungen wohl nur geringste Änderungen im Verhalten bedingen.

Zu den Ansprüchen gehören:

- Gewohnte Reichweite, Nutzerverhalten⁷, Zuverlässigkeit der Elektroantriebseinheit, Anwendung, Unterhalt⁸, Kosten, Sicherheit werden deshalb entscheidend sein, sowohl für den Erwerb und Betrieb von PHEV und EV als auch das zusätzliche Dargebot von Regelenergie.
- Hilfreich sind auch starke Rahmenbedingungen (Fördermittel, Gesetze) und Vorbilder (staatlich, unternehmerisch, Schlüsselpersonen).
- Mitentscheidend können auch Reputationsfragen sein.

Für die Bereitstellung von Regelenergie werden deshalb folgende Annahmen getroffen:

- PHEV fahren während 80 % der Kurz- und Langstreckenzyklen sowie während 50 % der Pendlerzyklen im Hybridbetrieb, so dass die Batterie während des Stillstands und bei Netzanschluss für Regelfunktionen zur Verfügung steht.
- Als Vereinfachung wird die Batterie für Regelfunktionen jeweils mit 50 % Ladung bereitgestellt, so stellt sie positive und negative Regelleistung bereit und kann Energie aufnehmen oder abgeben.
- Bei der Berechnung des Potentials wird berücksichtigt, dass Systemdienstleistungen für einen bestimmten Zeitraum ausgeschrieben werden und während diesem der Zugriff auf Batterieleistung und –energie jederzeit gewährleistet sein muss. Dieser Zeitraum für die Ausschreibung und damit für die jederzeitige Verfügbarkeit wird von 24 h (2015) auf 6 h (2035) gesenkt.

Mit der Bereitstellung von Regelenergie durch die Fahrzeugbatterien kann die Bereitstellung von Regelenergie in konventionellen Kraftwerken substituiert werden. Vor allem bei fossilen Regelkraftwerken ist die Bereitstellung von Regelenergie mit einem zusätzlichen Energieverbrauch und mit zusätzlichen Emissionen verbunden, da die Kraftwerke dazu in Teillast betrieben werden müssen, was gegenüber dem Normalbetrieb bei Nennlast einen reduzierten Wirkungsgrad zur Folge hat [Roth & Wagner, 2006; ETG, 2009]. Bei hydraulischen Pumpspeicherkraftwerken wären die Pumpverluste zu berücksichtigen. Für die Bereitstellung von Regelenergie durch die Fahrzeugbatterien wird deshalb eine Gutschrift berechnet, welche dem vermiedenen Energieverbrauch resp. den vermiedenen Emissionen in konventionellen Kraftwerken entspricht.

⁷ Continental-Studie [TNS / Infratest, 2009]

⁸ insbesondere Batterien

3.4 Weitere Datengrundlagen und Annahmen

Der kumulierte Energieaufwand und die CO₂-Emissionsfaktoren für die Elektrizitätsproduktion sowie die Treibstoffe stammen aus [Frischknecht & Tuchschmid, 2008].

Die Primärenergiefaktoren umfassen den kumulierten Energieaufwand, der zur Produktion einer Energiemenge oder eines Treibstoffes benötigt wird. Insbesondere fließt hier der Wirkungsgrad einer Anlage ein. Durch Einrechnung des Primärenergiefaktors kann der Verbrauch von Strom und Benzin verglichen werden, da der Verbrauch auf der gleichen Ebene, d.h. zum Beispiel Rohöl, betrachtet wird.

Mit den CO₂-Emissionsfaktoren werden die Treibhausgasemissionen der Produktion einer Energiemenge eingerechnet. So wird ersichtlich, ob der gefahrene Kilometer bei einem PHEV / EV oder einem konventionellen Verbrennungsmotor mehr Klimagase verursacht.

Tabelle 2 gibt eine Übersicht, auf welchen Stand der Technik sich die in [Frischknecht & Tuchschmid, 2008] verwendeten Werte beziehen [ecoinvent, 2007].

Tabelle 2: Übersicht Datenbasis Primärenergie-/ CO₂-Emissionsfaktoren

Technologie	Jahr der Bilanz	Stand der Technik
Kernkraft, Wasserkraft, Kehrricht-verbrennung	2000	Schweizerischer Kraftwerkspark
Windkraft	2000	Auswahl von Anlagen, die in der Schweiz in Betrieb sind
Photovoltaik	2006	Auswahl von Anlagen, die in der Schweiz in Betrieb sind
Geothermie	1999 und 2006	Hot dry rock - Verfahren
Erdgas-GuD, Kohlekraftwerk, Blockheizkraftwerke	2000	Beste verfügbare Technologie in Deutschland
CH-Strommix	2004	Verbrauchermix
UCTE-Strommix	2004	

Durch die Weiterentwicklung und Erneuerung der Kraftwerke steigt der durchschnittliche Wirkungsgrad des Kraftwerksparks, wodurch die Primärenergie- und CO₂-Emissionsfaktoren mit der Zeit abnehmen. Da dafür kein Zahlenmaterial verfügbar ist, wurde dieser Effekt im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, d.h. die Faktoren sind über die Zeit konstant. Während für den fossilen Kraftwerkspark Werte der besten verfügbaren Technik verwendet wurden, die im gesamten Kraftwerkspark erst mit dem allmählichen Ersatz alter Kraftwerke erreicht werden, ist der heutige neue erneuerbare Kraftwerkspark gegenüber den verwendeten Werten bereits weiterentwickelt.

[Frischknecht & Tuchschmid, 2008] unterteilen die Primärenergiefaktoren in einen fossilen, einen nuklearen und einen erneuerbaren Anteil. D.h. sie unterscheiden nach Nutzung von fossilen, erneuerbaren und nuklearen Ressourcen. Der erneuerbare Anteil wird in den Ergebnissen separat ausgewiesen - der fossile/nukleare Anteil ist in den Abbildungen blau dargestellt, der erneuerbare Anteil grün - um eine Unterscheidung zwischen der Nutzung von Wind, Sonne etc. und der Nutzung von fossilen oder nuklearen Brennstoffen machen zu können.

Bei den Treibstoffen wird die Nutzung umgerechnet in Fahrzeugkilometer von Personenwagen. Damit werden die Treibstoffherstellung und der Einsatz im Fahrzeug berücksichtigt, Umweltauswirkungen von Fahrzeugherrstellung oder Strassenbau werden nicht erfasst.

4 Ergebnisse

4.1 Einzelfahrzeuge

Energie (foss. Treibstoffe + el. Fahrplanenergie)

2015 (Markteinführung)

Auf der Stufe Tank-to-wheel – also bis zur Stufe Fahrzeugtank und ohne Berücksichtigung der Stromerzeugung respektive der Treibstoffproduktion – weisen sowohl PHEV wie auch EV massiv geringere Verbrauchswerte auf als konventionelle Fahrzeuge (Abbildung 8). Der höhere Wirkungsgrad des elektrischen Antriebssystems und der durch das Hybridsystem optimierte Betrieb des Verbrennungsmotors wirken sich gegenüber den Neuwagen mit 100 % Verbrennungsmotor (mit 5.6 l/100km entsprechend dem EU-Zielwert von 130 g CO₂/km) deutlich aus. Die Unterschiede zwischen PHEV und EV sind relativ gering, da die angenommene Batteriekapazität der PHEV (8 kWh) bereits genügt, um Fahrten bis über 40 km und somit 75 % der Jahreskilometer rein elektrisch zurückzulegen.

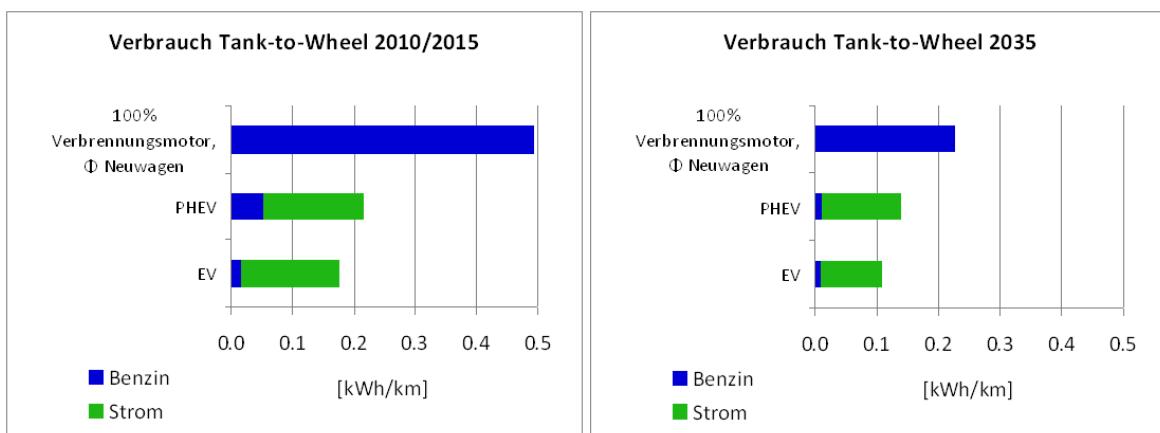


Abbildung 8: Fahrzeugverbrauch Tank-to-Wheel 2010/2015 und 2035

Auf der Stufe Well-to-Wheel – also mit Berücksichtigung der vorgelagerten Prozesse zur Benzinerstellung und Stromerzeugung sowie den damit verbundenen Wirkungsgrad- und Transportverlusten – ergibt sich für PHEV und EV mit Strom aus erneuerbaren Energien eine Reduktion des Energieverbrauchs um über 50 % (Abbildung 9). Wird Strom aus nicht erneuerbaren Energiequellen eingesetzt, liegt der Primärenergieverbrauch hingegen in einer ähnlichen Größenordnung wie bei konventionellen Fahrzeugen, wobei sich mit Gas-GuD eine spürbare Reduktion und mit Strom aus Kernkraftwerken (KKW) oder Kohlekraftwerken eine leichte Erhöhung des Primärenergieverbrauchs ergibt. Produktionsmix UCTE und Bezugsmix Schweiz unterscheiden sich nur geringfügig voneinander und lassen die PHEV und EV nur wenig besser als die reinen Verbrennungsmotoren abschneiden.

Die graue Energie, d.h. die für die Vorkette / Herstellung der Batterie benötigte Energie, spielt keine entscheidende Rolle.

Entwicklung bis 2035

Auf der Stufe Tank-to-Wheel bleiben immer noch deutliche Vorteile für PHEV und EV bestehen, allerdings fällt die Differenz zu den stark verbesserten konventionellen Neuwagen (mit 2.6 l/100km entsprechend dem fortgeführten EU-Zielwert von 60 g CO₂/km⁹) geringer aus, als noch 2015 (Abbildung 8).

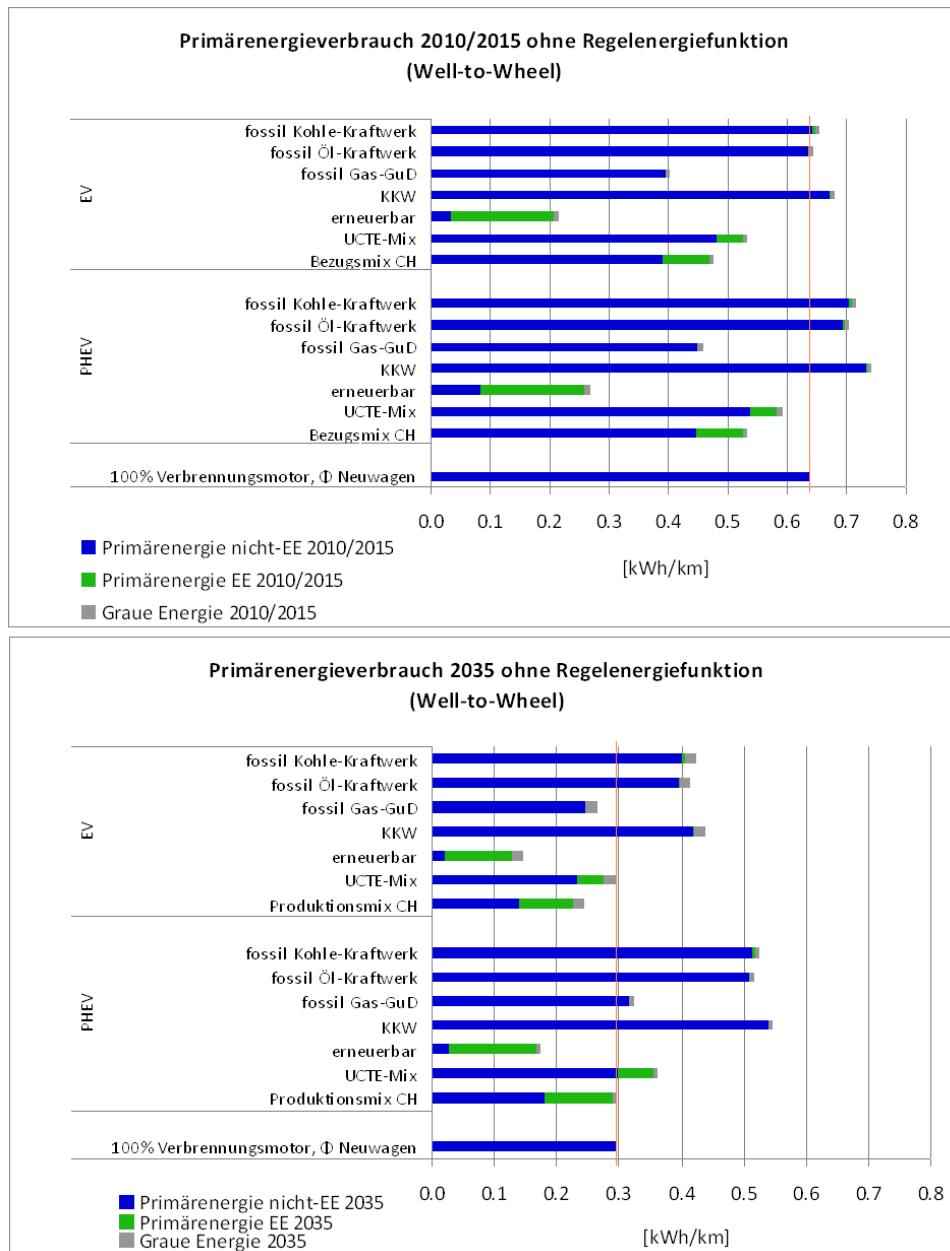


Abbildung 9: Verbrauch Well-to-Wheel je nach Stromherkunft 2010/2015 und 2035

⁹ In der EU-Verordnung sind Ziele bis 2020 gesetzt [EU, 2009b], der Wert von 60 g CO₂/km entspricht einer Weiterführung des Abnahmepfads bis 2035.

Auf der Stufe Well-to-Wheel ergibt sich mit einer Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energieträger weiterhin eine starke Reduktion des Energieverbrauchs (Abbildung 9). Mit allen anderen Stromerzeugungsarten ergeben sich nur noch geringe Vorteile (Gas-GuD) oder gar wesentlich höhere Verbrauchswerte (KKW und Kohlekraftwerke). Für den Schweizer Mix wurde gegenüber 2015 vom Bezugs- auf den Produktionsmix gewechselt.¹⁰ Zu beachten ist bei diesen Ergebnissen, dass ein verbesserter Wirkungsgrad im Kraftwerkspark nicht einbezogen wurde.

2035 spielt die Graue Energie eine grössere Rolle, jedoch verändert sie die Ergebnisse nicht in relevantem Mass.

CO₂-Emissionen

Die Ergebnisse betreffend den CO₂-Emissionen unterscheiden sich von den Ergebnissen bezüglich Energieverbrauch folgendermassen:

Auf der Stufe Tank-to-Wheel sind die Vorteile der PHEV und EV gegenüber konventionellen Fahrzeugen noch grösser, da die CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung nicht berücksichtigt werden (Abbildung 10). Die CO₂-Emissionen bei den EV sind auf das Heizen mit Benzin zurückzuführen.

Auf der Stufe Well-to-Wheel bestehen hinsichtlich CO₂-Emissionen mit Ausnahme des Strombezugs aus Kohle- oder Ölkraftwerken durchwegs Vorteile für PHEV resp. EV (Abbildung 11). Der Stromerzeugungsmix der Schweiz und der UCTE sowie die Stromerzeugung mit Kernkraftwerken schneiden wesentlich besser ab als bei der Betrachtung des Primärenergieverbrauchs. Auch wenn für die Schweiz ein Bezugsmix eingesetzt wird, schneiden PHEV und EV gegenüber Verbrennungsmotoren bezüglich CO₂ besser ab.

Auch hier gilt zu beachten, dass die Wirkungsgradverbesserungen im Kraftwerkspark nicht einbezogen wurden.

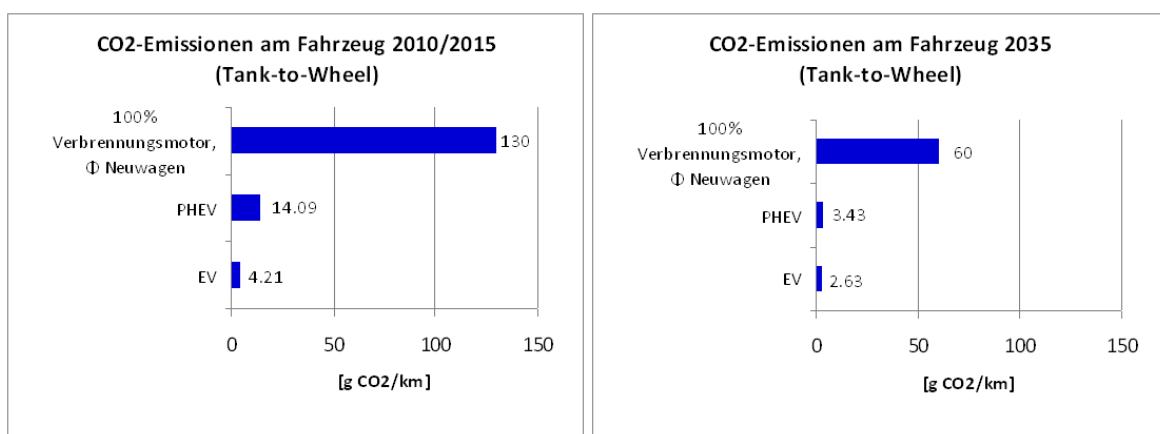
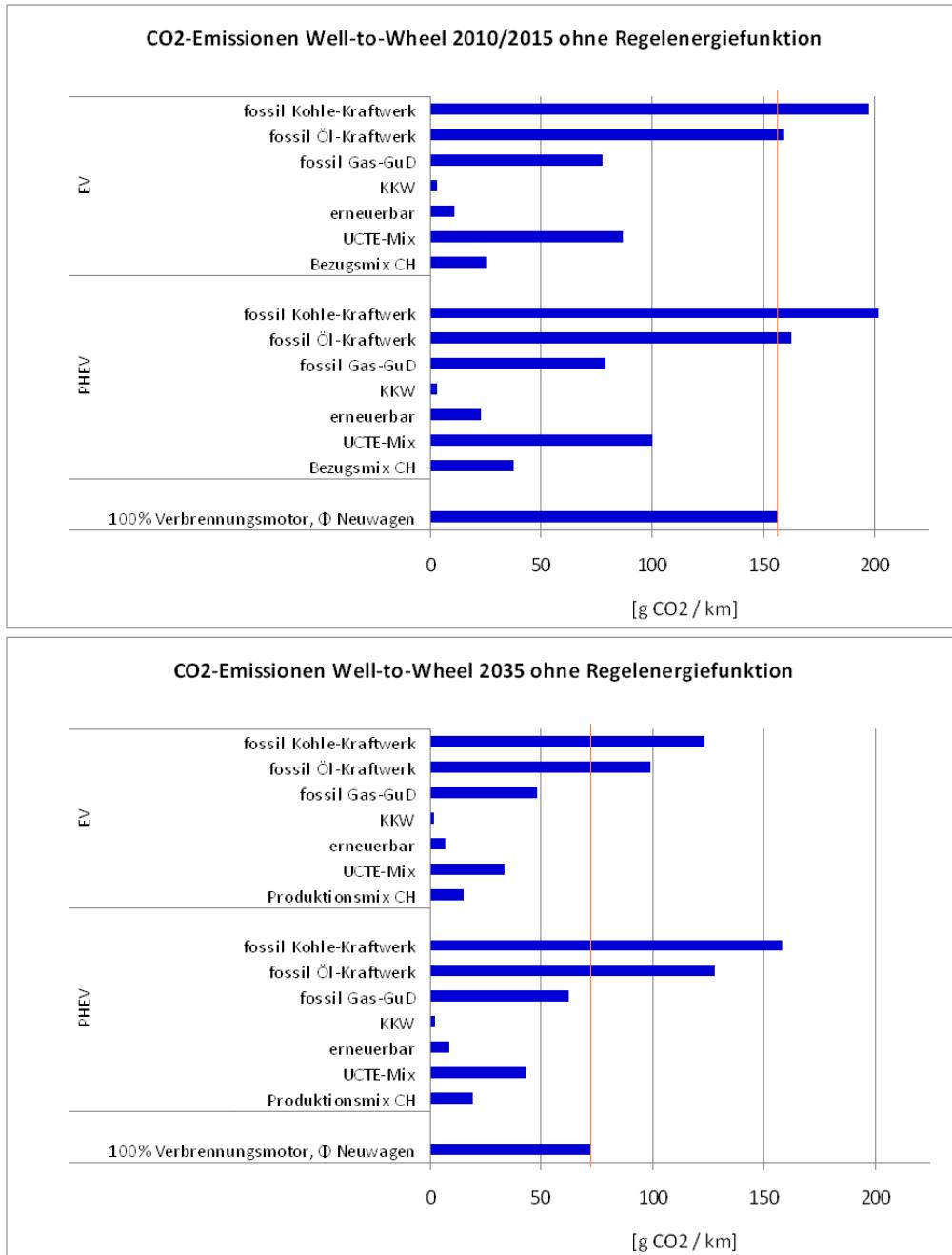


Abbildung 10: CO₂-Emissionen am Fahrzeug, 2010/2015 und 2035

¹⁰ Dies ist darauf zurückzuführen, dass für den Bezugsmix keine Prognosen existieren, siehe auch unter 3.3.

Abbildung 11: CO₂-Emissionen Well-to-Wheel je nach Stromherkunft 2010/2015 und 2035

4.2 Gesamte Fahrzeugflotte

Energie (foss. Treibstoffe + el. Fahrplanenergie)

Während die Flotte der EV und PHEV 2015 erst 0.35 % des heutigen Elektrizitätsbedarfs benötigt, stellen PHEV und EV 2035 25 % der Gesamtflotte und benötigen als Flotte 3 % des heutigen Elektrizitätsbedarfs (1.8 TWh, Abbildung 12). Die grössere Zahl der PHEV führt zu einem dominanten Anteil der PHEV am Bedarf¹¹.

¹¹ Die Anzahl der PHEV im Markt beträgt zu jedem Zeitpunkt das drei- bis fünffache der Anzahl EV.

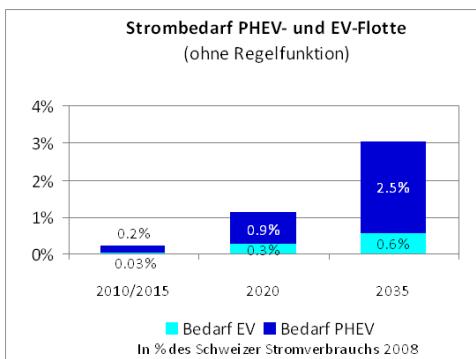


Abbildung 12: Entwicklung des Strombedarfs der PHEV- und EV-Flotte als Anteil am heutigen gesamtschweizerischen Stromverbrauch

Bei der unterstellten Marktentwicklung der PHEV und EV spielt der Primärenergiebedarf der EV- und PHEV-Flotte verglichen mit dem Primärenergieverbrauch der konventionellen Flotte mit reinem Verbrennungsmotor erst 2035 eine Rolle. Fahren die PHEV und EV mit erneuerbarem Strom, können auf Stufe Primärenergie durch die Einführung von 1.2 Mio. PHEV und EV 4'000 GWh/a eingespart werden. Die Einsparung beim Benzin beträgt gegenüber einer Flotte mit 100 % reinen Verbrennungsmotoren 25 %.

CO₂-Emissionen

Die CO₂-Emissionen der PHEV und EV als Flotte nehmen erst 2035 relevante Ausmasse an, verglichen mit der Flotte mit reinen Verbrennungsmotoren. Werden erneuerbarer Strom oder Kernenergie verwendet, sind die CO₂-Emissionen der 25 % Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben mit rund 126'000 t resp. 32'000 t CO₂ pro Jahr so gut wie vernachlässigbar. Gegenüber einer Flotte mit ausschliesslich konventionellen Fahrzeugen werden ca. 1 Mio. t CO₂-Emissionen vermieden.

Zum Vergleich: Die CO₂-Emissionen des Schweizer Verkehrssektors inkl. LKW, Zug u.w. betragen 2007 16.35 Mio. t CO₂-Äquivalente, d.h. etwa dreimal so viel, wie die konventionelle Flotte im Jahr 2035 noch benötigen soll [BAFU, 2009].

4.3 Potential für Bereitstellung von Regelfunktionen in der Schweiz

Angebot für die Regelzone

Die von der angenommenen Flotte aus PHEV und EV zur Verfügung gestellte Regelleistung steigt zwischen 2015 und 2035 sehr stark an. Die Zunahme ist einerseits auf die wachsende Menge an PHEV und EV und die grösseren Batterien, aber auch Entwicklungen im Markt für Systemdienstleistungen zurückzuführen. Durch die angenommene Entwicklung kann ab der Zeit zwischen 2020 und 2035 mit einem relevanten Beitrag an die Systemdienstleistungen gerechnet werden. 2035 können Fahrzeubatterien die gesamthaft benötigte Regelleistung bereitstellen. (Abbildung 13). Selbst wenn mit einer Zunahme der vorgehaltenen Regelleistung um 1/3 bis 2/3 (je nach Art der Regelung) gerechnet wird, decken die Fahrzeubatterien gut ¾ der für die Schweizer Regelzone notwendigen Leistungsreserven.

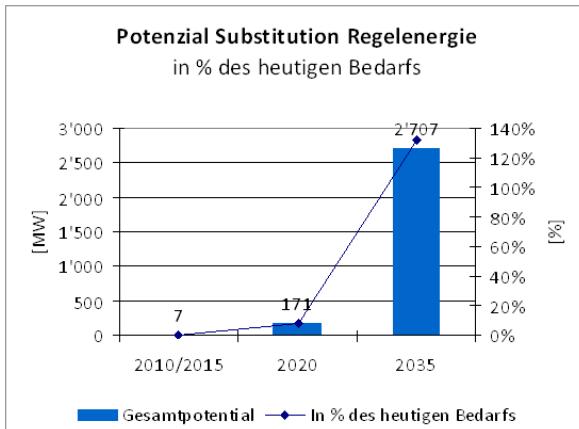


Abbildung 13: Entwicklung des Regelpotentials durch PHEV und EV

Für die Einführung der Systemdienstleistungen durch Fahrzeugbatterien können folgende Überlegungen gemacht werden:

Pooling von Erzeugungseinheiten für Systemdienstleistungen ist möglich. Das heisst konkret, dass die Fahrzeugbatterien mit anderen Kraftwerken, z.B. Speicherkraftwerken oder Gas-GuD, gekoppelt werden können. Durch diese Kombination können PHEV und EV bereits relativ früh für Systemdienstleistungen herangezogen werden.

Der Markt für Systemdienstleistungen unterscheidet verschiedene Produkte. Swissgrid bspw. schreibt für Primärregelung symmetrische Regelleistungsbänder von minimal +/-3 MW aus, für Sekundärregelung symmetrische Regelleistungsbänder von minimal +/-10 MW, für Tertiärregelung wird positiv und negativ getrennt ausgeschrieben, Mindestgrösse ist ebenfalls +/-10 MW. Die Anzahl Fahrzeuge, die pro MW Regelleistung benötigt werden, sinkt von 2015 bis 2035 um einen Faktor 15 bis 20¹². Während 2015 10'600 PHEV für 1 MW benötigt werden, sind es 2035 noch 700, für EV sinkt die Zahl von 4'300 auf 200 Fahrzeuge. Dies hat Implikationen u.a. auf den Aufwand, um Systemdienstleistungen mit Fahrzeugbatterien anzubieten.

Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung werden unterschiedlich häufig und unterschiedlich lange abgerufen.¹³ Solange die Lebensdauer der Batterien, resp. die Anzahl Lade-/Entladezyklen, noch eine starke Rolle spielt, scheint Tertiärregelung, die am seltensten tatsächlich abgerufen wird, den Einstieg in den Markt zu öffnen. Durch Pooling bestehen jedoch auch für Primär- und Sekundärregelung Möglichkeiten für erste Einsätze vor 2035.

Angebot für Bilanzgruppen

Bisher wurde das Potential auf Systemdienstleistungen der Swissgrid, d.h. der Regelzone Schweiz, bezogen. Werden die Fahrzeugbatterien zum Ausgleich von Bilanzgruppen eingesetzt, so erschliessen sich neue Möglichkeiten: Die Bilanzgruppen haben ein Interesse, jederzeit einen ausgeglichenen Saldo zu haben, respektive ihrem angemeldeten Fahrplan zu entsprechen. Das heisst, sie versuchen, Produktion und Verbrauch ausgeglichen zu halten, denn Differenzen zum Fahrplan werden als Ausgleichsenergie verrechnet [VSE (ed.), 2006; Swissgrid, 2009]. Fahrzeugbatterien könnten nun eingesetzt werden, um diese Differenzen auszuregeln. Dazu gelten die Anforderungen der Swissgrid und der UCTE nicht, die Bilanz-

¹² Dies ist auf die zunehmende Kapazität der Autobatterie und die Annahme über kürzere Ausschreibungszeiträume für Systemdienstleistungen zurückzuführen.

¹³ Dies zeigen z.B. die Daten zur abgerufenen Sekundärregelleistung und Minutenreserve der deutschen Regelzonenbetreiber [DÜN, 2009].

gruppen sind frei, den Einsatz der Fahrzeugbatterien ihren Bedürfnissen entsprechend zu regeln, wodurch die Einführung der Fahrzeugbatterien für diesen Einsatz bereits früher möglich sein könnte.

4.4 Ökologische Auswirkungen der Regelfunktion im europäischen Kontext

Einzelfahrzeug

Erbringen Fahrzeugbatterien Systemdienstleistungen, wird der konventionelle Kraftwerkspark entlastet. Dies bedeutet, dass mehr Speicherkraftwerke zur fahrplanmässigen Elektrizitätsproduktion zur Verfügung stehen und dass fossile und nukleare Kraftwerke nicht im Teillastbetrieb mit reduziertem Wirkungsgrad gefahren werden müssen, was wiederum Brennstoffeinsparungen bringt. PHEV und EV erhalten deshalb für die folgenden Überlegungen eine Gutschrift, wenn sie Regelfunktionen übernehmen. Die Gutschrift wird berechnet in Form einer Reduktion des Energieverbrauchs resp. der CO₂-Emissionen pro km.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Veränderung bei Energieverbrauch (Well-to-Wheel) und CO₂-Emissionen auf, wenn die Fahrplanenergie von der jeweils angegebenen Technologie bezogen wurde und die Fahrzeugbatterien Regelkraftwerke des Schweizerischen Kraftwerksparks entlasten, d.h. v.a. Wasserkraftwerke und in kleinerem Ausmass Kernkraftwerke.

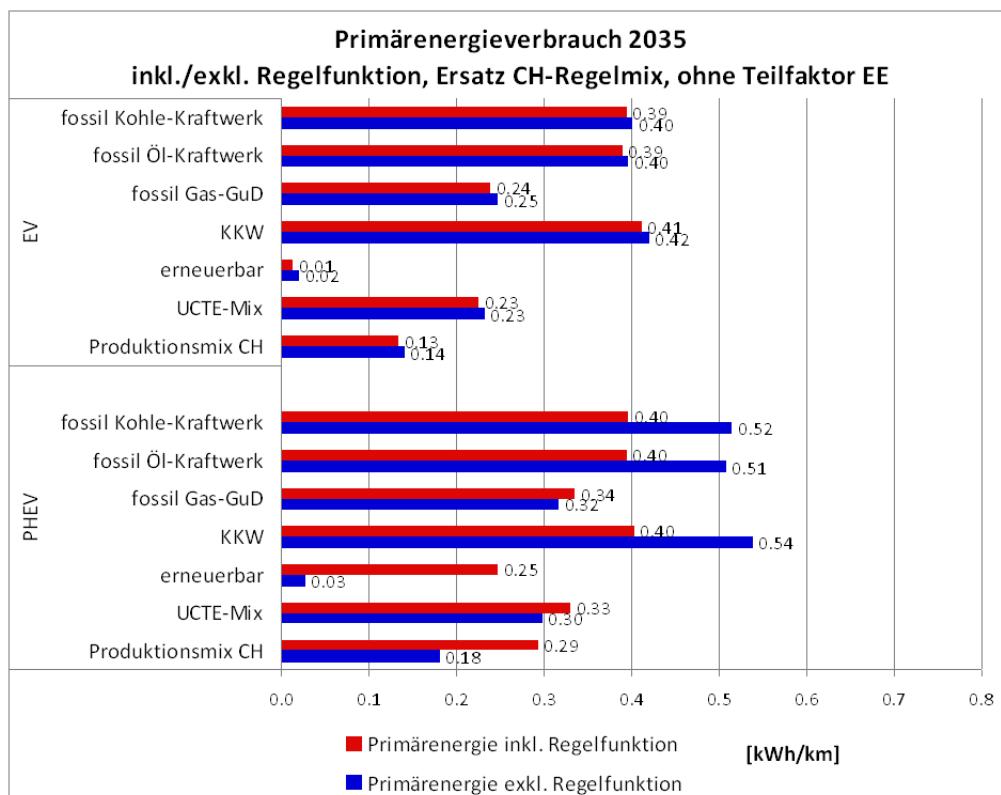


Abbildung 14: Auswirkungen der Regelfunktion auf den Verbrauch Well-to-Wheel pro Fahrzeug 2035, wenn die Fahrplanenergie von der angegebenen Technologie bezogen und Regelfunktion im Schweizerischen Kraftwerkspark ersetzt wird.

Abbildung 14 zeigt auf, dass durch die Regelfunktion nicht für alle Stromtechnologien eine Verminderung des Primärenergiebedarfs resultiert:

EV als Regelkraftwerke bringen generell eine leichte Energieeinsparung bei der Betrachtung Well-to-Wheel, unabhängig davon, woher die Fahrplanenergie stammt.

PHEV bringen eine Energieeinsparung (Well-to-Wheel), wenn vorher Elektrizität aus Kohle-, Öl-, Kernkraftwerken oder ein Strommix bezogen wurde. Hingegen nimmt der Primärenergiebedarf zu, wenn mit Elektrizität aus Gas-GuD- oder erneuerbarer Energie gefahren wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die PHEV durch die Regelfunktion vermehrt mit Hybridbetrieb statt rein elektrisch fahren. Dies ist notwendig, damit die Batterie im Stand soweit geladen ist, dass eine Regelfunktion überhaupt möglich ist. Während die Primärenergieeinsparung bei Kohle-, Öl- und Kernkraftwerken die Regelfunktion die vermehrte Hybridfahrweise überwiegt, gilt dies für Wasser- und Gaskraftwerke nicht.

Für die CO₂-Emissionen (Abbildung 15) ist das Ergebnis noch etwas ausgeprägter. Speziell zu betrachten sind folgende zwei Aussagen:

Wird Strom von Kernkraftwerken bezogen und Regelfunktion in der Schweiz ersetzt, so werden die CO₂-Emissionen gerade ausgeglichen.

Im Gegensatz zum Vergleich bezüglich Primärenergie wird bei den CO₂-Emissionen auch eine Einsparung erzielt, wenn Strom aus Gas-GuD getankt wird.

Während sich der Regelmix in der Schweiz zu fast 100 % aus Wasserkraft zusammensetzt, machen in der UCTE fossile Kraftwerke einen Grossteil des Regelkraftwerkspark aus. Die Auswirkungen durch weniger Bereitstellung von Regelleistung im UCTE-Kraftwerkspark sind über den verbesserten Wirkungsgrad und die dementsprechend kleineren Primärenergieverbräuche und Emissionen der fossilen Kraftwerke weitreichender als beim Schweizer Kraftwerkspark (Abbildung 16 und Abbildung 17).

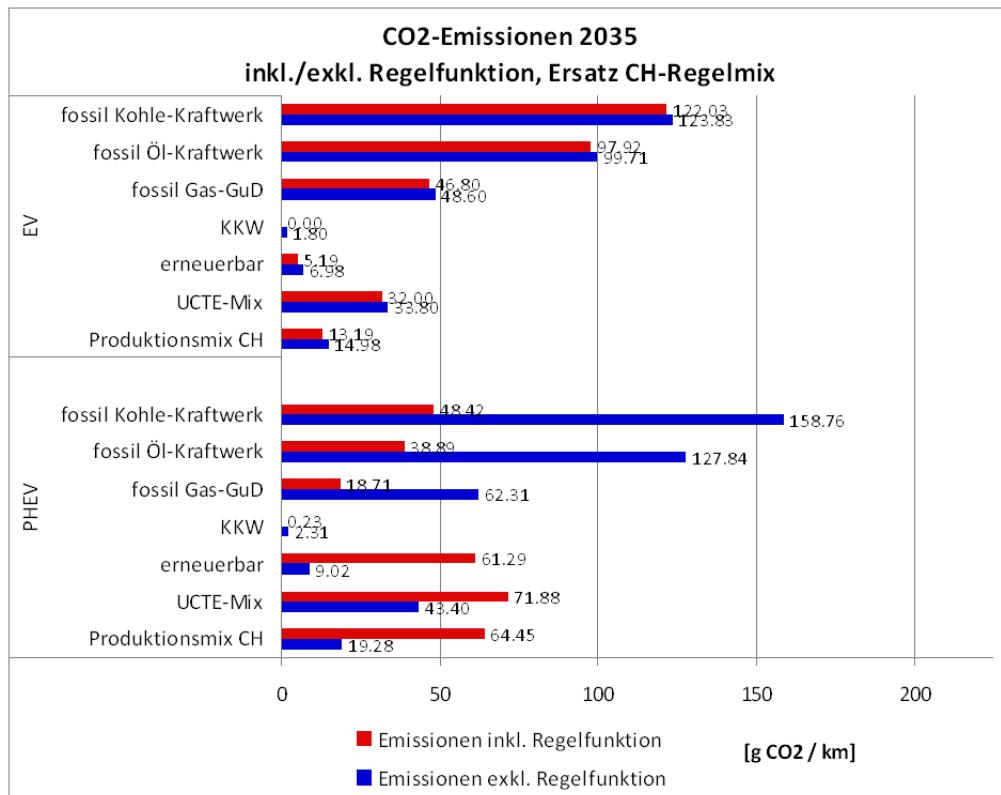


Abbildung 15: Auswirkungen der Regelfunktion auf die CO₂-Emissionen pro Fahrzeug 2035, wenn die Fahrplanenergie von der angegebenen Technologie bezogen und Regelfunktion im Schweizerischen Kraftwerkspark ersetzt wird.

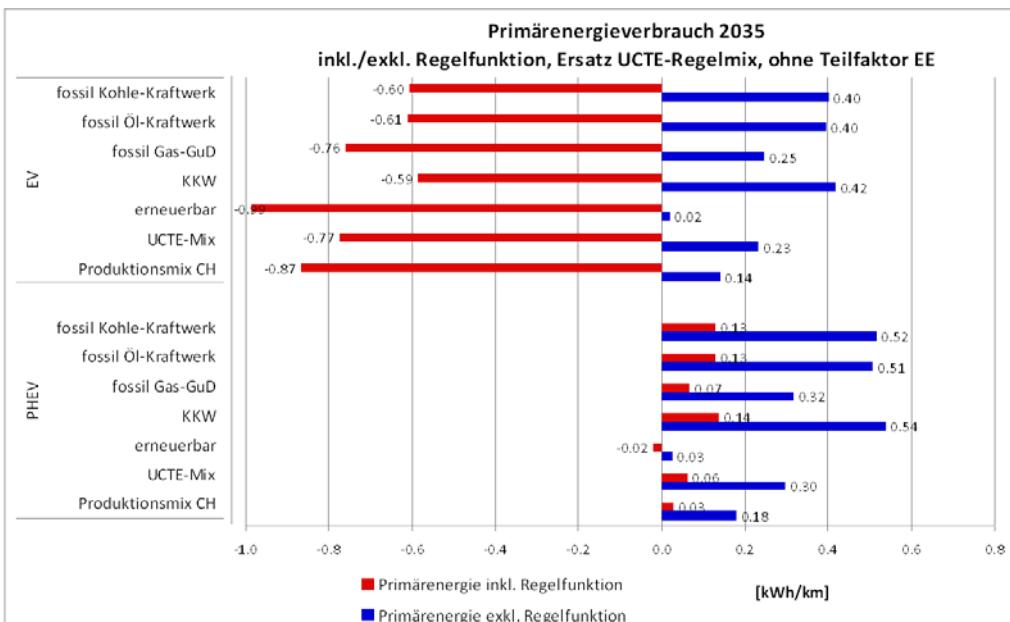


Abbildung 16: Auswirkungen der Regelfunktion auf den Verbrauch Well-to-Wheel pro Fahrzeug 2035, wenn die Fahrplanenergie von der angegebenen Technologie bezogen und Regelkraftwerke in der UCTE ersetzt werden.

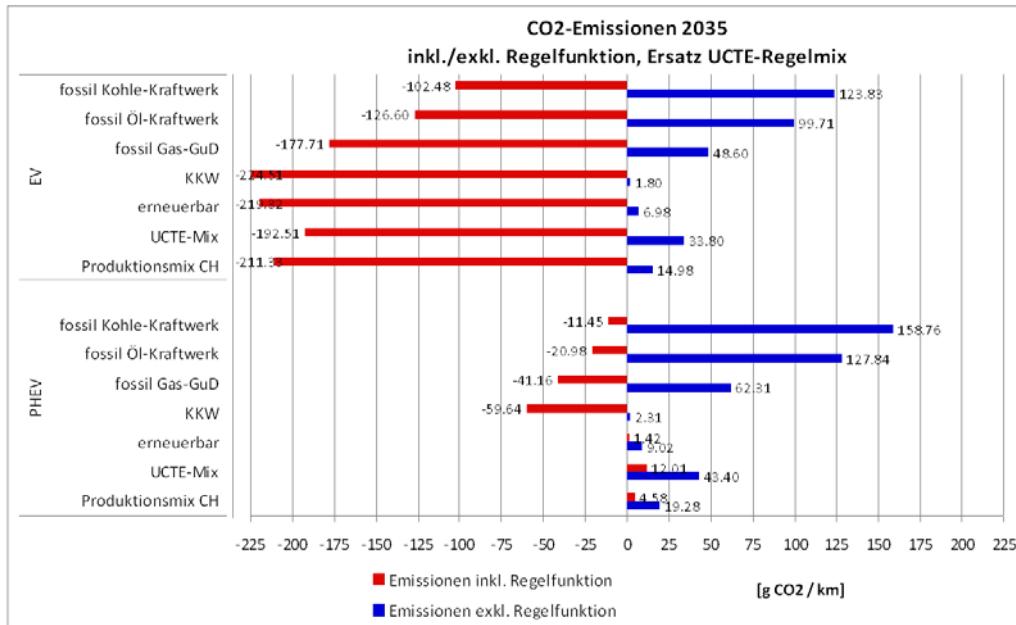


Abbildung 17: Auswirkungen der Regelfunktion auf die CO₂-Emissionen pro Fahrzeug 2035, wenn die Fahrplanenergie von der angegebenen Technologie bezogen und Regelkraftwerke in der UCTE ersetzt werden.

Wird hingegen Regelfunktion in jenen Kraftwerkstypen ersetzt, von denen auch der Strom nach Fahrplan bezogen wird, so muss noch einmal differenziert werden (Abbildung 18 und Abbildung 19): Während der Einsatz von EV als Regelkraftwerke in jedem Fall eine Energieeinsparung bringt (Well-to-Wheel), nehmen Energieverbrauch und CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel) bei PHEV zu, wenn erneuerbare Energie oder der Schweizer Produktionsmix betrachtet werden.

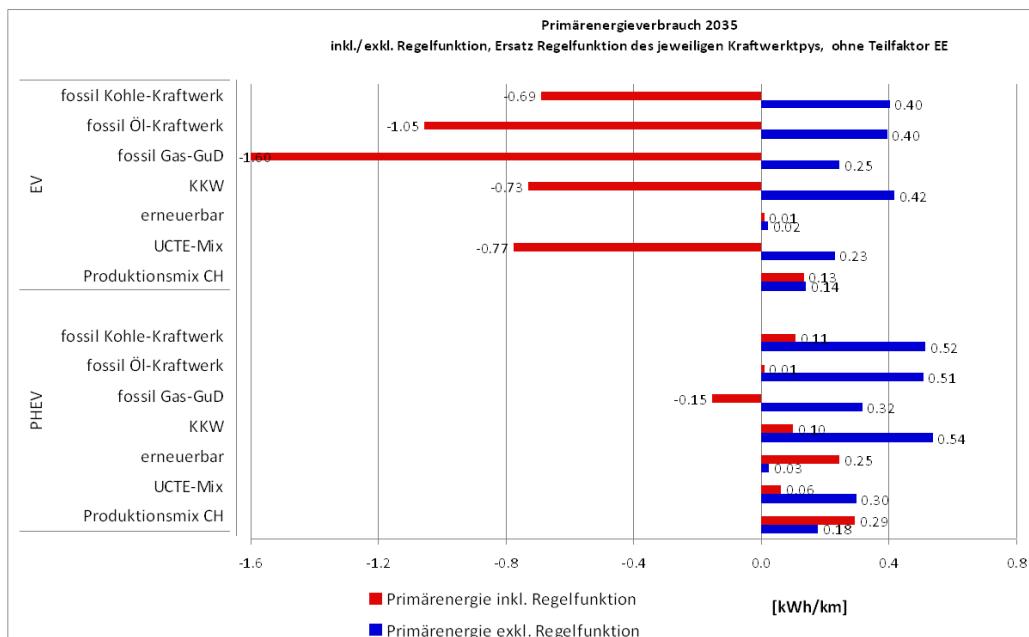


Abbildung 18: Auswirkungen der Regelfunktion auf den Verbrauch Well-to-Wheel pro Fahrzeug 2035, wenn die Fahrplanenergie von der angegebenen Technologie bezogen und dieselben Kraftwerke ersetzt werden.

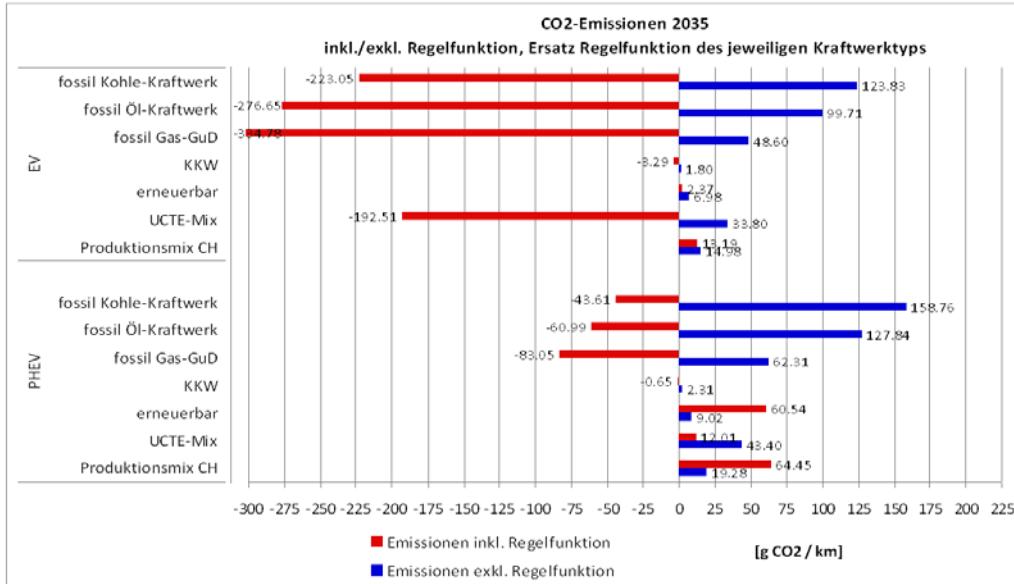


Abbildung 19: Auswirkungen der Regelfunktion auf die CO₂-Emissionen pro Fahrzeug 2035, wenn die Fahrplanenergie von der angegebenen Technologie bezogen und dieselben Kraftwerke ersetzt werden.

Flotte

Im Folgenden wird der Ersatz von Regelfunktion im Schweizer Kraftwerkspark betrachtet.

Wird die Gutschrift für die Regelenergiefunktion beim Verbrauch auf die Flotte hochgerechnet, so reduziert dies den Elektrizitätsbedarf der PHEV- und EV-Flotte von 1.8 auf 0.8 TWh und damit auf 1.3 % des heutigen Strombedarfs (Abbildung 20). Der Anteil der PHEV ist gegenüber dem Bedarf ohne Regelfunktion markant gesunken. Dies ist darauf zurückzuführen, dass PHEV mit Regelfunktion vermehrt im Hybridbetrieb fahren.

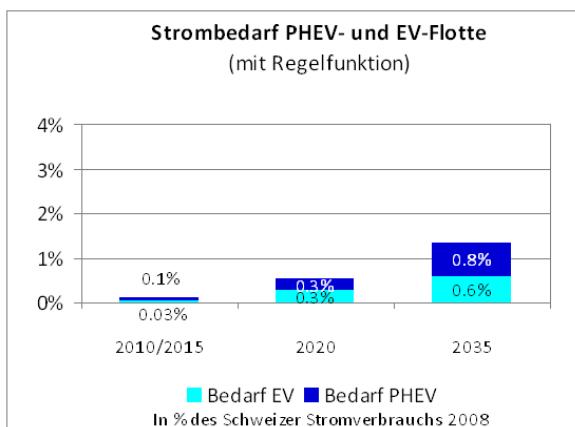


Abbildung 20: Entwicklung des Strombedarfs der PHEV- und EV-Flotte als Anteil am heutigen gesamtschweizerischen Stromverbrauch mit Einbezug der Regelfunktion und einer Gutschrift für die Entlastung des konventionellen Kraftwerksparks

Während die Regelfunktion und die Anrechnung einer Gutschrift den Bedarf an Fahrplanenergie reduziert, sinkt die Benzineinsparung gegenüber einer Flotte mit 100 % reinen Verbrennungsmotoren: Während sie ohne Regelfunktion 25 % betrug, sind es durch den Mehrbedarf der PHEV an Benzin nur noch 11 %.

5 Relation zu Szenarien

5.1 Energieperspektiven 2035

Die Energieperspektiven zeigen unterschiedliche Szenarien in Bezug auf Energienachfrage und deren Deckung auf. Beim Elektrizitätsbedarf reicht das Spektrum von steigendem („Weiter wie bisher“) über sich stabilisierenden („Verstärkte Zusammenarbeit“) bis zu sinkendem Bedarf („Neue Prioritäten“ und „2000 Watt-Gesellschaft“). In Bezug auf den Verkehr wird von einer schnelleren oder langsameren Abnahme des Treibstoffverbrauchs bei den jährlich in Verkehr gesetzten Personenwagen ausgegangen, wobei in keinem Szenario der EU-Zielpfad bezüglich CO₂ verfolgt wird, d.h. der Verbrauch von Neuwagen sinkt weniger stark als in dieser Studie angenommen. Der Einsatz von Bio- und Synfuels ist eingerechnet, jedoch weder eine Elektrifizierung des Automobilverkehrs noch der Einsatz von mobilen Brennstoffzellen.

Das in dieser Arbeit verwendete Szenario III setzt ambitionierte, aber nicht unrealistische Ziele und schafft Rahmenbedingungen, die den Annahmen dieser Studie nicht unähnlich sind. So wird auf Einsatz der effizientesten Technologien in allen Bereichen gesetzt und die Diffusion dieser Technologien bis 2035 als realistisch angesehen.

Die Flotte der PHEV und EV wird bis 2035 1.8 TWh Strom benötigen, was sowohl 3 % des heutigen Strombedarfs der Schweiz wie auch des Verbrauchs 2035 gemäss Szenario III entspricht (Szenario III geht von einer steigenden Nachfrage bis 2025 aus und anschliessend einem Rückgang auf das heutige Niveau).¹⁴ Mit der Variante C & E (wenige Grosskraftwerke und erneuerbare Energien) ist nicht das gesamte Potential der erneuerbaren Energien ausgeschöpft, so dass für den Verbrauch der PHEV und EV im Rahmen von ca. 3 % des gesamten Bedarfs zusätzliche erneuerbare Kapazitäten erschlossen werden könnten.

Der Benzinverbrauch reduziert sich gegenüber einer Flotte nur aus Verbrennungsmotoren pro Jahr um 395 Mio. Liter Benzin. Bis 2035 werden 25.9 % der PKW-Flotte mit PHEV und EV ersetzt, wodurch 24.65 % des Benzins eingespart werden können.

Im Szenario III bleiben Grosskraftwerke (fossil und nuklear) eingeplant. Für die Ermittlung des Regelenergiebedarfs dürfte deshalb weiterhin der Ausfall eines Grosskraftwerkes massgebend bleiben. Der Vergleich des Potentials mit den heutigen Regelreserven scheint deshalb plausibel.

5.2 2000 Watt-Gesellschaft

Macht Elektromobilität im Rahmen einer nachhaltigen Energieversorgung Sinn? Unter der Annahme, dass der „Idealzustand“ 2000 Watt-Gesellschaft erreicht wird, unabhängig vom Zeitpunkt, können wir davon ausgehen, dass sich die Elektrizitätsproduktion in der Schweiz zu einem grossen Teil auf erneuerbare Quellen stützt [Berg & Real, 2006]. Die Dezentralität würde zunehmen und die Umsetzung von Smart Grids (im Verteilnetz) scheint eine Voraussetzung [Eberhard (ed.), 2004]. Als wichtigste Felder zur Erreichung werden Erhöhung der Material- und Energieeffizienz, Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger und Reduktion der CO₂-Intensität der übrigen Nutzung fossiler Energien sowie neue Lebens- und Unternehmensformen genannt.

PHEV und EV stellen in diesem Szenario einen Teil der Lösung dar: Das elektrische Antriebssystem verfügt über einen höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren, das Hybridsystem ermöglicht einen op-

¹⁴ Im Gegensatz bspw. zu Szenario I, „Weiter wie bisher“, in welchem die Elektrizitätsnachfrage bis 2035 auf über 68 TWh ansteigt.

timierteren Betrieb des Verbrennungsmotors. Die Verwendung von erneuerbarem Strom senkt die CO₂-Intensität des Strassenverkehrs und trägt so auch zur Erreichung der 500 Watt bei, welche in der 2000 Watt-Gesellschaft noch für fossile Energien zur Verfügung stehen.¹⁵ PHEV und EV können gezielt geladen werden und damit stochastisch anfallende erneuerbare Produktion aufnehmen. PHEV werden Teil der Flotte bleiben, da sie die Flexibilität über längere Strecken gewährleisten.

Novatlantis hat für die Vision der 2000 Watt-Gesellschaft ermittelt, wie viel Energie für die einzelnen Verbrauchsbereiche zur Verfügung gestellt werden kann. So wurde u.a. der Mobilität, die durch Autos ermöglicht wird, ein Wert von 140 Watt pro Person zugewiesen [Humm & Lütolf (ed.), 2005]. In der vorliegenden Studie wird ein Mix zwischen Kurz-, Pendler- und Langstrecken angenommen, mit jährlich ca. 12`600 gefahrenen Kilometern pro Fahrzeug¹⁶. Wir die durchschnittliche Besetzung von 1.57 Personen pro Fahrzeug miteinbezogen, so kommt ein EV-Fahrer 2015 auf 160 Watt, bis 2035 sinkt der Wert auf 100 Watt, womit ein EV mit dem heutigen Fahrverhalten und zukünftigen Verbrauchswerten mit der 2000 Watt-Gesellschaft kompatibel wäre. Für Nutzer von konventionellen Autos mit Verbrennungsmotor liegt der Verbrauch 2015 bei 450 Watt resp. 210 Watt für 2035. Mit 140 Watt pro Person, können EV-Fahrer mit den angenommenen Verbrauchswerten 2035 gut 17`500 km zurücklegen (d.h. 1/3 mehr als heute), konventionelle Verbrennungsmotoren hingegen nur gerade 8`500 km pro Jahr (d.h. 1/3 weniger als heute). Wird Strom aus erneuerbaren Energien getankt, kommen EV ohne fossile Energie aus. Bei den PHEV nimmt der Anteil der mit Benzin gefahrenen Kilometer von 27 % 2015 auf 4 % im Jahr 2035 ab.

Alleine die Umstellung auf Elektromobilität genügt für eine nachhaltige Mobilität nicht, denn nachhaltige Mobilität berücksichtigt nicht nur Verbrauchswerte und CO₂-Emissionen, sondern auch Verkehrsaufkommen u.ä. Neben Ansätzen in Bezug auf eine Verschiebung des Modalsplits, einer Mobilitätspolitik mit neuen Priorisierungen, einer höheren Besetzung der Fahrzeuge und Anreizen bezüglich Gewicht und Grösse der Fahrzeuge kann auch Elektromobilität einen Teil zur nachhaltigen Mobilität beitragen.

¹⁵ Dies entspricht der 1-Tonne- CO₂-Gesellschaft.

¹⁶ Die folgenden Berechnungen basieren auf den regulären Verbrauchswerten ohne Regelfunktion.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1 Schlussfolgerungen

Je nach Herkunftsart der eingesetzten Elektrizität können PHEV und EV verglichen mit konventionellen Fahrzeugen (100 % Verbrennungsmotor) in Bezug auf den Energiebedarf und die CO₂-Emissionen Vorteile oder Nachteile aufweisen. Dabei ist zu beachten, dass die PHEV und EV mit reinen Verbrennungsmotoren verglichen werden, welche die CO₂-Zielwerte der EU erreichen.

Stammt die eingesetzte Elektrizität aus erneuerbaren Energien, so ergeben sich – unter Betrachtung der gesamten Vorkette (Well-to-Wheel) – sehr grosse Vorteile. Mit Strom aus Kernkraftwerken können zwar die CO₂-Emissionen stark reduziert werden, aber es ergeben sich durch den geringen Wirkungsgrad deutliche Nachteile bezüglich Primärenergie. Während sich bei der fossilen Stromerzeugung für Erdgas-GuD-Anlagen nur geringe Unterschiede gegenüber konventionellen Fahrzeugen ergeben, sieht die Bilanz für Kohle- oder Ölkraftwerke global gesehen negativ aus.

Ob ein verstärkter Einsatz von PHEV und EV aus energie- und klimapolitischer Sicht forciert werden soll und entsprechend förderungswürdig ist, bedingt die Betrachtung der gesamten, globalen Energiekette und hängt somit entscheidend von der Herkunft des Stromes bzw. der Produktionsart ab. Es gilt, für die eingesetzten Elektrizität die richtigen Rahmenbedingungen zu setzen und entsprechend die Deklaration des Energieverbrauchs festzulegen (Tank-to-Wheel versus Well-to-Wheel).

Während durch die Einführung von EV und PHEV der Elektrizitätsbedarf etwas steigt, sinkt der Benzinbedarf. Bei einem Ersatz von einem Viertel der Flotte durch EV und PHEV werden bis zu 3 % des heutigen Strombedarfs benötigt, der Benzinbedarf reduziert sich dafür um ca. 25 %. Im Vergleich dazu werden die Einsparpotenziale durch parallele Entwicklungen wie die Markteinführung von Smart Metering und begleitende Dienstleistungen zur Nachfragesteuerung auf 5 % geschätzt [Dettli, 2009]. Ein umfassendes Smart Grid kann den Strom-Mehrverbrauch durch eine verstärkte Elektromobilität also bis zu einem recht bedeutenden Masse durch parallele Effizienzsteigerungsmassnahmen kompensieren.

Das Potential der Regelfunktion erreicht zwischen 2020 und 2035 die Grösse der heutigen Regelleistungsreserven. Durch die Ausschreibungsbedingungen oder das Pooling mit anderen Erzeugungstechnologien ist ein Einsatz bereits vor 2020 in relevantem Mass denkbar. Als Einstieg scheint Tertiärregelung geeignet, da sie am seltensten tatsächlich abgerufen und damit die Batterie nur selten beansprucht wird. Ausserdem ist ein Einsatz auf der Ebene der Bilanzgruppen näher zu betrachten, die damit Zahlungen für Abweichungen vom Fahrplan vermeiden können.

Die ökologischen Auswirkungen der Regelfunktion sind unter verschiedenen Gesichtspunkten zu diskutieren¹⁷:

Der Einsatz von EV als Regelkraftwerke bringt Einsparungen sowohl bei der Energie als auch bei den CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel) unabhängig davon, woher die Fahrplanenergie bezogen wird.

Mit den Annahmen bezüglich Batteriekapazitäten, Ausschreibungsbedingungen und Fahrverhalten muss bei PHEV beim Angebot von Regelfunktion in Kauf genommen werden, dass häufiger im Benzin- und Hybridmodus und weniger rein elektrisch gefahren wird. Dies bedeutet, dass zwischen dem Nutzen der Regelfunktion und dem Nutzen der Benzineinsparung bei PHEV abzu-

¹⁷ Zu beachten ist hier, dass die Herkunft des Stromes, der in der Schweiz für die Gewinnung zusätzlicher Wasserressourcen in Pumpspeicherwerken eingesetzt wird, nicht berücksichtigt ist.

wägen ist. Einsparungen bei Energie und CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel) werden erreicht, so lange fossile oder nukleare Elektrizität zum Fahren getankt wird.

Die ökologischen Verbesserungen durch den Einsatz von Fahrzeugbatterien sind in Bezug auf den Schweizer Regelmix nur minim, für den Ersatz des UCTE-Regelmixes hingegen kann ein Vielfaches der durch den Strombezug benötigten Primärenergieverbrauchs, resp. der verursachten CO₂-Emissionen, eingespart werden. Setzt man EV gezielt zum Ersatz von fossiler Regelung ein, wird ebenfalls ein Vielfaches der benötigten Primärenergie, resp. der CO₂-Emissionen eingespart. Bei den PHEV wird ebenfalls eine Einsparung erzielt, wenn PHEV fossile Regelkraftwerke entlasten, die Einsparungen liegen in der Größenordnung der verbrauchten Energie, resp. der produzierten CO₂-Emissionen.

Durch die Bereitstellung von Systemdienstleistungen sowie durch die in vielen Situationen bestehende zeitliche Flexibilität beim Laden der Batterien (z.B. nachts) können PHEV und EV in Zukunft (unter Berücksichtigung der Weiterentwicklung u.a. der Batterien) ein wesentliches Element bilden, um hohe Anteile an stochastisch anfallender Wind- und Solarenergie ins Elektrizitätsnetz zu integrieren.

Mit der Markteinführung von EV und PHEV können folgende weitere positive Effekte erzielt werden:

- deutliche Verminderung der Schadstoffemissionen (NO_x und CO)
- Verminderung der Lärmemissionen, insbesondere im Stop-and-Go-Verkehr (Anfahren)
- volkswirtschaftliche Effekte in der Schweiz - v.a. durch neue Marktchancen für die Schweizer Elektrotechnikbranche als Zulieferer der Automobilindustrie und geringeren Import von fossiler Energie
- Die Fahrzeuge sind CO₂-seitig bereits heute mit dem EU-Zielwert 2020/2035 kompatibel, sofern sie mit erneuerbarer Energie betrieben werden. Es darf erwartet werden, dass sie damit auch die konventionellen Fahrzeuge in Zugzwang bringen, sodass die Effizienzpotenziale dort schneller genutzt werden.
- eventuell Schonung von Landschafts- und Naturwerten, wenn z.B. zusätzliche Pumpspeicher-Kraftwerke in den Alpen durch PHEV und EV vermieden werden.

Zusätzliche negative Effekte sind insbesondere durch die Entsorgung der zusätzlichen elektrotechnischen Komponenten (Batterien, Elektromotor, Steuerung) und durch die Beanspruchung von nur in begrenztem Umfang vorhandenen Rohstoffen (z.B. Lithium) möglich.

6.2 Empfehlungen

Empfehlungen zu Dienstleistungen

Treten die erwarteten technischen Entwicklungen ein, so entstehen neue Geschäftsmodelle an den Schnittstellen Automobilität / Elektrizitätsversorgung. Abbildung 21 stellt die angenommenen Entwicklungsschritte dar.

Die Geschwindigkeit der Entwicklungsschritte für die Markteinführung von EV und PHEV hängt entscheidend von den technischen und industriellen Fähigkeiten in der Autoindustrie, aber auch von den begleitenden Entwicklungen in der Energieversorgungsbranche bzw. bei Smart Grids ab. So sollen in der EU bis 2022 alle Haushalte mit elektrischen Stromzählern ausgestattet werden [Dettli, 2009; EU, 2006]. Zu den angesprochenen Entwicklungen zählen der Fortschritt bei der Batterietechnologie in Richtung Bereitstellung von Energie für das Netz, das Preis / Leistungs-Verhältnis von Batterien im Vergleich zu anderen Regulierungsproduzenten, rechtliche und technische Eingriffsmöglichkeiten in die Fahrzeuge und die Motiva-

tion der Autofahrenden, ihr Auto für entsprechende Dienste zur Verfügung zu stellen, sowie der Austausch von Energie und Informationen zwischen Netz und Fahrzeugen.

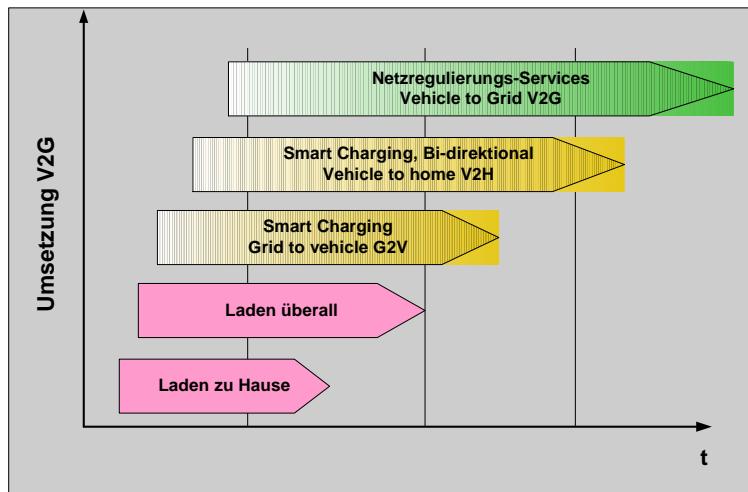


Abbildung 21: Entwicklungsschritte des Konzepts Vehicle-to-Grid

Des Weiteren gibt es zahlreiche generelle marktwirtschaftliche Aspekte wie Preisveränderungen bei den Ressourcen, spezifische Ausgestaltung des liberalisierten Elektrizitätsmarktes, die Entwicklung neuer Technologien und Wirtschaftsförderungsprogramme, die bei der Markteinführung eine wesentliche Rolle spielen, hier aber nicht explizit aufgeführt und berücksichtigt werden können. Rahmenbedingungen für die Unterstützung von PHEV, EV sowie Systemdienstleistungen werden im Kapitel Rahmenbedingungen genannt.

Den in Tabelle 3 genannten Dienstleistungen und deren ökologischer Ausgestaltung werden grundsätzlich positive Chancen eingeräumt, da sie in den nächsten 5-25 Jahren eine lukrative Geschäftsentwicklung unterstützen und die Positionierung der Energieversorgungsunternehmen stärken können. Einige Aspekte werden gar als grundlegend für die Position im Markt angesehen. Chancen und Risiken sind im Detail im Anhang aufgeführt.

Tabelle 3: Mögliche Dienstleistungen

Dienstleistungen EVU	Beschreibung
Erfüllung bestimmter Kriterien in der Umwelt- und Sozialverträglichkeit und Green Marketing	Thematische Positionierung mit ausdrücklichen Vermeidungsstrategien CO ₂ sowie Steigerung Energieeffizienz und erneuerbare Energie ist zentral für die Sicherung des Stammgeschäfts.
Mehr-Verkauf von Ladestrom	Positionierung als Anbieter von Ladestrom mit spezifischer Lieferung von Strom oder Zertifikaten, die sicherstellen, dass die Energie- und Klimabilanz bei der Verwendung in PHEV und EV positiv ausfällt. Ein freier Bezug von Strom (z.B. aus Teillast-betriebenen Kohlekraftwerken nachts) kann den Energieverbrauch bzw. die Klimagasemissionen über die Werte konventioneller Autos erhöhen. Spezielle Tarife und eine einfache Handhabung fördern die Marktakzeptanz.

Leasing von Fahrzeugen und Komponenten	Die Senkung der Kapitalkosten und –risiken v.a. des Batterieeinsatzes ist essentiell. Es dürfte jedoch notwendig sein, die Benutzung von Batterien in einem eigens entwickelten Dienstleistungspaket zu integrieren bzw. sie auch nach der Nutzung im Fahrzeug noch als stationären Speicher im Stromnetz zu nutzen.
Flottenbetrieb mit PHEV und EV	Das Verhalten ist bei Flotten im Gegensatz zu einzelnen Fahrzeugen viel besser prognostizierbar. Deshalb kann die Stromversorgung besser vorausgesagt werden bzw. auch das Regelfunktionspotenzial optimaler genutzt werden. Einzelfahrzeuge werden erst mit der entsprechenden Einführung der Informationstechnologie für Regelfunktionen verfügbar werden.
Netzoptimiertes Laden	Durch die Speicherung von erneuerbaren Energien während tiefen Nachfragezeiten kann durch Stromlieferanten zusätzlich Strom abgesetzt werden. Mit heute bereits getesteten Technologien kann die Energiegewinnung mit der Nachfrage abgeglichen werden, was die optimale Lösung darstellt, um die Produktion aus erneuerbaren Energien mit dem Einsatz beim Verbraucher zu koppeln (Ladestrom aus definierten Stromquellen).
Bereitstellen von Regelenergie mit Hilfe von Autobatterien	Die Stromqualität beim Laden ist zentral für die ökologische Qualität einer möglichen Dienstleistung im Bereich Regelenergie. Wichtiger Einflussfaktor auf der Fahrzeugseite ist außerdem die Festlegung des Verhältnisses zwischen Substitution Benzin und Bereitstellung von möglichst viel Regelenergie beim PHEV (der sonst eher mit Benzin fährt) und EV (der zwischen erwarteter Reichweite und Abgabe entscheiden muss). Die Batterienutzungsdauer, deren Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz kann durch "second use" im Stationärbetrieb deutlich verbessert werden.

Rahmenbedingungen

Mitentscheidend für die Markteinführung sind neben technischen Entwicklungen geeignete und wirksame Rahmenbedingungen. Die beschriebenen Entwicklungen und breite Markteinführung der Fahrzeuge, von Smart Grids sowie von Regelbeziehungen zwischen EVU und Fahrzeugen sind von zahlreichen Faktoren abhängig. Wesentliche Bereiche, die dazu sorgfältig bearbeitet werden müssen und durch geeignete Instrumente positiv wirken, wurden aufgrund einer Marktanalyse evaluiert und mit den Zielsetzungen des Bundesamtes für Energie und der Arbeit in der Interessengemeinschaft Vehicle to Grid abgestimmt.

Auch hier sind generelle Rahmenbedingungen für die Marktentwicklung in der vorliegenden Studie nicht explizit aufgeführt (Fördermittel für Pilotprojekte, Berücksichtigung von Konjunkturpaketen, Forschungskoordination zwischen den Disziplinen und Ämtern, Kampagnenarbeit, etc.).

Für die Energie- und Klimabilanz der Markteinführung von PHEV und EV relevante Aspekte sind (Tabelle 4):

Tabelle 4: Relevante Aspekte der Markteinführung bezüglich Energie- und Klimabilanz

Bereich	Kurzfristig (2-5 Jahre)	Mittelfristig (> 5 Jahre)
Förderung und Ordnungsrecht auf Bundesebene	<p>Damit die Klimaschutzzvorteile ausgeschöpft werden, sollten Elektrofahrzeuge und PHEV mit Strom aus erneuerbaren Energien (evtl. mit Ökolabel) betrieben werden. Sobald weitere Forschungsergebnisse vorliegen, kann "Strom mit geeigneter Qualität" präzisiert werden. Einfache "Nachts laden"-Modelle haben sonst den Effekt, dass vermehrt Strom aus fossilen Teillast-Kraftwerken getankt wird [Jakob, 2009].</p> <p>PHEV sollten gerade aufgrund der hohen positiven Wirkung bei 75 % der Fahrten und der einfacheren und schnelleren Markteinführung nicht gegenüber EV benachteiligt werden.</p> <p>Regelung der Betriebsmodi, um zu verhindern, dass PHEV durch übermäßige Abgabe von Regelernergie nur mit Benzin gefahren werden.</p>	<p>Um die Markteinführung zu fördern, sollte vorerst auf die Erhebung eines "Treibstoffzolls" für Ladestrom aus erneuerbaren Quellen verzichtet werden. Bonus/Malus, Zugangsbeschränkungen zu Innenstädten und Road Pricing sind weitere starke Instrumente, die jedoch stark objekt- und weniger verhaltensbezogen wirken können.</p> <p>Die parallele Förderung von Smart Metering und begleitender Dienstleistungen zur Nachfragesteuerung ermöglicht die Realisierung einer Strom-Einsparung, welche den Mehrverbrauch des elektrischen Betriebs von mindestens 25 % der Fahrzeugflotte ausgleichen kann.</p>
Institutionelle Verankerung	<p>Starke Verknüpfung mit den verwandten Bereichen (Mobilität, Umweltschutz, Raumplanung, Wirtschaftsförderung) und Interessensgruppen.</p> <p>Spezifische interdisziplinäre Elektromobilitäts-Strategie ausarbeiten u.a. mit Klimaschutzstrategie.</p> <p>Nationale Strategie nach dem deutschen Vorbild ausarbeiten.</p>	<p>Neue Energieszenarien mit Elektromobilität Smart Grids und V2G als integralem Bestandteil.</p>
Öffentlichkeitsarbeit	<p>Proaktive Information über Elektromobilität sowie deren Nutzen und Chancen, aber auch Risiken (Stromqualität) und erwartete Zeiträume, damit die Wartezeit auf konkrete Produkte nicht zu einer Schädigung der Kaufbereitschaft führt.</p> <p>Vorteile/Aspekte von Elektromobilität, Smart Grids und V2G benennen und relativieren.</p>	<p>Aus- und Weiterbildungsmassnahmen entwickeln, damit die zukünftigen Schlüsselakteure in Technologiefirmen und bei Kunden die Potenziale nutzen können.</p>

Forschung (national und international)	<p>Das Feld der Ökobilanzierung von Elektromobilen und dem Vehicle to Grid-Konzept steht am Beginn, insbesondere die Frage der Life Cycle Analysis (produktionsseitige Effekte, Elektrik, Elektronik und Batterien inkl. deren second use im Stationärbetrieb) ist kritisch¹⁸.</p> <p>Spezifizierung und Modellierung der effektiv erzielbaren energetischen, ökologischen, ökonomischen und sozialen Potenziale.</p> <p>Angewandte Forschung zur Notwendigkeit von Infrastrukturausbau (Anzahl Steckdosen, Orte, Ladeleistung) und Fragen wie Kundenzufriedenheit und Nachfrage.</p> <p>Integration der Technologien in ein nachhaltiges Verkehrssystem, umfassende Verkehrs- und Wohnprojekte.</p> <p>Begleitende Forschung zum Markteintritt der Technologien und Auswirkungen auf Kunden, Firmen, Wirtschaft.</p> <p>Vertiefende Forschung Technologien (Batterien, Lade- / Entlademanagement, Kommunikation, Fahrzeugtechnik, Recycling).</p> <p>CH-Partizipation an europäischen und internationalen Forschungsprogrammen bzw. Forschungsprojekten (IEA, EU, etc.) zur Bündelung der Kräfte.</p>	<p>Koordinations- und Integrationsprojekte (Technik, Dienstleistungen, EVU, Auto) sowie dazugehörige Tarifierung und – Verrechnung.</p> <p>Spezifische Smart Grids- und V2G-Projekte.</p> <p>Rückspeisungs- und Regelfunktions-Tests.</p> <p>Upscaling von Infrastruktur und deren Auswirkungen.</p>
Gesetzliche Grundlagen und Förderbedingungen	<p>Entwicklung von nützlichen Rahmenbedingungen (gesetzliche und freiwillige Marktinstrumente) wie Labels für Ladestrom etc.</p> <p>Normierungskonzepte und Standardisierung von Netzanschlüssen, Datenaustausch etc.</p> <p>Skizzieren von Massnahmen (freiwillige und gesetzliche) zur Steuerung der ökologischen Qualität des Betriebs.</p> <p>Ökologisch und sozial optimierte Mobilitätsfördermodelle, die alle Verkehrsträger optimal nutzen und auf die spezifischen Gegebenheiten (Stadt/Land) bzw. Ansprüche (Luftemissionen, Lärm, CO₂, etc.) abgestimmt sind, bzw. die Nutzerinnen und Nutzer entsprechend motivieren.</p>	<p>Entwicklung gesetzlicher Grundlagen für die Beziehungen zwischen Fahrzeughaber und Elektrizitätsversorger (Qualitäts-Standards, Sicherheitsrichtlinien für Fahrzeuge, Infrastruktur und Kommunikation)</p> <p>Entwicklung von Ausschreibungsbedingungen für Regelenergie, die den Einsatz (zeitlich, Menge) ermöglicht.</p> <p>Regional und lokal optimales Mobilitätsmanagement unter Einbezug aller Verkehrsarten, um höchstmögliche Energieeffizienz und Verringerung von Klimagassen zu erreichen.</p>

¹⁸ Dort müssen anteilmäßig höhere Belastungen erwartet werden, da mit der Absenkung des Benzin-Verbrauchs der relative Anteil der ökologischen Belastung von Seiten Herstellung des Autos deutlich steigt: Von heute 20-25 % (konventionelle Benzinautos) auf 50 % (bei einer Halbierung des Verbrauchs). Diese Effekte sind in keiner bisherigen Ökobilanz berücksichtigt. Auch müssen weitergehende Umweltauswirkungen (Schadstoffe Batterie etc.) erst untersucht werden. Arbeiten sind dabei, die Bewertung zu vertiefen (EMPA; BFE; EWI, Fraunhofer u.a.)

6.3 Offene Fragen

Die vorliegende Studie eröffnet Ausblicke in weitergehende Fragestellungen, die im Folgenden überblicksartig aufgeführt werden sollen.

- **Stromherkunft:** Inwiefern soll die Zeitgleichheit von Herstellung / Bezug berücksichtigt werden, resp. reicht eine Jahresbilanz? Wie kann die Transparenz für den Kunden gewährleistet werden, resp. wie können Verkauf- und Vermarktungsaktivitäten überprüft werden?
- **Geschäftsmodelle:** Wie soll die Beziehung zwischen Autofahrenden und dem Energieversorger ausgestaltet werden, z.B. in Bezug auf Netzzugang, Haftung und Datenschutz? Inwieweit soll diese vom Staat begleitet werden? Wie kann die Einspeisung oder der Bezug zu bestimmten Zeiten gefördert / verhindert werden? Wie kann das Anbieten von Systemdienstleistungen unter Berücksichtigung der Autofahrenden und ihrer Bereitschaft, die Batteriekapazität zur Verfügung zu stellen, eingeführt werden?
- **Bilanzierung Nachhaltigkeit:** Die Ökobilanzierung muss für die Elektromobilität noch weiterentwickelt werden. Dabei müssen die sich entwickelnden Technologien berücksichtigt werden und möglichst umfassende Betrachtung angestrebt werden, d.h. inklusive Knappheit von Materialien, soziale Aspekte wie Sicherheitsfragen und Gefahrenstoffe und Gewinne in anderen Bezugssystemen (wie beispielsweise Ersatz von Grossspeichern).
- **Förderung:** Wie können bei der Förderung von Elektromobilität Fragen der Stromherkunft, Effizienz, des Fahrzeuggewichts und der Verwendung (z.B. bezüglich Fahrtenlänge, Tageszeit von Bezug / Einspeisung) sowie des Modalsplits mit einbezogen werden?
- **Technik / Normen:** Verbesserungen bei Batterien, Kommunikation, Effizienz der Fahrzeuge und Veränderungen beim Netzbetrieb können die Marktentwicklung stark beeinflussen. Wie können die Normierung und die Entwicklung von Qualitätsstandards beschleunigt werden? Entscheidend für einen möglichst offenen Wettbewerb wird sein, dass für die wesentlichen Schnittstellen möglichst rasch international gültige Normen bestehen.
- **Marktentwicklung:** Wie lassen sich die verschiedenen Elemente des Marktes integrieren (z.B. Infrastruktur, Kommunikation, juristische Fragen)? Wie kann der Marktdurchbruch beschleunigt werden? Welche Hemmnisse sind entscheidend?
- **Wirtschaftlichkeit:** In dieser Studie wurden keine Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit angestellt. Diese sollten im Zusammenhang mit der Netzentwicklung, anderen Speichertechnologien oder im Tagesgang fundiert analysiert werden.
- **Modellierung:** Die vorliegenden Berechnungen ersetzen keine Modellierung. Um Szenarien durchzurechnen, wird empfohlen, auf spezialisierte Modellrechnungen zurückzugreifen, welche auch wirtschaftliche Kriterien des gesamten Kraftwerksparks bzw. der Autoindustrie spezifisch einbeziehen.

7 Referenzen

- AEE, 2009 Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (2009). Hintergrundinformation Erneuerbare Elektromobilität. Stand April 2009. Internet: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/hintergrundinfo_erneuerbare_elektromobilitaet_apr09_02.pdf [Stand 1.12.2009]
- Alpiq, 2009 Alpiq (2009). Electric vehicle market penetration in Switzerland by 2020. Internet: http://www.alpiq.com/images/alpiq-booklet-electric-vehicles_tcm95-62306.pdf [Stand 4.12.2009]
- Asendorpf, 2009 Asendorpf, D. (2009). Die Mär vom emissionsfreien Fahren. Zeit online. 2.10.2009. Internet: <http://www.zeit.de/2009/39/T-Elektroauto?page=1> [Stand 1.12.2009]
- BAFU, 2009 Bundesamt für Umwelt BAFU (2009). Emissionen nach CO2-Gesetz und Kyoto-Protokoll. Letzte Aktualisierung: 19.06.2009. Internet: <http://www.bafu.admin.ch/klima/06538/06541/06589/index.html?lang=de> [Stand 30.11.2009]
- BAFU, 2010 Bundesamt für Umwelt BAFU (2010). Zustandsbericht Klima. Indikatoren "Fahrleistung des privaten motorisierten Personenverkehrs", "Treibhausgas-Emissionen Wirtschaft", "Treibhausgas-Emissionen Haushalte", "Treibhausgas-Emissionen Strassenverkehr". Zuletzt aktualisiert am 08.01.2010. Internet: <http://www.bafu.admin.ch/umwelt/status/03985/index.html?lang=de> [Stand 18.01.2010]
- Beck, 2009 Beck, M (2009). Grundlagen Systemdienstleistungsprodukte, Produktbeschreibung – gültig ab 1. Februar 2010. Swissgrid. Version 5.0 vom 27. November 2009. Internet: http://www.swissgrid.ch/power_market/grid_operation/ancillary_services/as_documents/document/D091127_AS-Products_V5R0.pdf?set_language=de [Stand 7.1.2010]
- Berg & Real, 2006 Berg, M. & Real, M. (2006). Road Map Erneuerbare Energien Schweiz: Eine Analyse zur Erschliessung der Potenziale bis 2050. Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften. Internet: <http://www.satw.ch/aktuell/roadmap> [Stand 27.11.2009]
- Borggrefe et al., 2008 Borggrefe, F. et al. (2008). Wissenschaftlicher Workshop Plug-in Hybrid Electric Vehicles. 18. Juli 2008, Schloss Wahn, Köln. Organisiert vom Energiewirtschaftlichen Institut, Köln, und dem Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe. Internet: <http://elib.dlr.de/59501/1/PHEV-Workshop-Koeln-Schier.pdf> [Stand 7.1.2010]
- BSTP, 2008 Bureau of Science and Technology policy, Cabinet Office, Government of Japan (2008). Environment & Energy Technology Roadmap and Diffusion Scenario. Reference material for the "Low Carbon Technology Plan". Council for Science and Technology Policy 75th session, May 19, 2008. Internet: http://www8.cao.go.jp/cstp/english/doc/low_carbon_tec_plan/ref_roadmap1.pdf [Stand 23.12.2009]
- Brischke et al., 2006 Brischke, L., Hoppe-Kilper, M., Tiedemann, A. (2006). Regel- und Reservebedarf bei Ausbau der Stromerzeugung mit regenerativen Energien bis 2015. ew Jg 105 (2006), Heft 1-2. Seiten 22-25.
- BFE, 2007 Bundesamt für Energie BFE, Energiewirtschaft (2007). Die Energieperspektiven 2035. Band 1 (Synthese), Band 2 (Szenarien I bis IV). Internet: <http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00538/index.html?lang=de> [Stand 27.11.2009]

- BFE, 2009 Bundesamt für Energie BFE (2009). Überblick über den Energieverbrauch der Schweiz im Jahr 2008. Auszug aus der Schweizerischen Gesamtenergiestatistik 2008. Juni 2009. Internet: <http://www.news-service.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/16028.pdf> [Stand 1.12.2009]
- BFS, 2007 Bundesamt für Statistik BFS (2007). Mobilität in der Schweiz: Ergebnisse des Mikrozensus zum Verkehrsverhalten.
Fact Sheet. Neuchâtel, 15.5.2007. Internet:
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index.Document.91826.pdf> [Stand 7.1.2010]
Publikation komplett: Internet:
http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/publikationen_statistik/publikationskatalog.Document.91873.pdf [Stand 12.1.2010]
- Cuomo et al., 2009 Cuomo, V. et al. (2009). Technical Report n° T5.20 – RS 2a "Final report on the integrated Pan-European Model". NEEDS-Project. Internet: www.needs-project.org/2009/TechnicalPapers/RS2a%20T5.20.doc [Stand 27.11.2009]
- Dettli, 2009 Dettli, R. et al. (2009). Smart Metering für die Schweiz – Potenziale, Erfolgsfaktoren und Massnahmen für die Steigerung der Energieeffizienz. Ecoconcept in Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe Energie- und Kommunikationstechnologien EnCT GmbH im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Schlussbericht 17. November 2009. Internet:
http://www.bfe.admin.ch/04266/index.html?lang=de&dossier_id=04264 [Stand 18.01.2010]
- Deutsche Bundesregierung, 2009 Bundesregierung Deutschland (2009). Leitmarkt Elektromobilität, Zentrale Handlungsfelder der Bundesregierung. Referat Hubert Steinkemper.
- Duvall, 2008 Duvall, M. (2008). Plug-In Hybrids on the Horizon, Building a Business Case. EPRI. Internet: http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/EPRI_Journal/2008-Spring/1016422_PHEV.pdf [Stand 7.1.2010]
- Eberhard (ed.), 2004 Eberhard, J. (ed.) (2004). Steps towards a sustainable development. A White Book for R&D of energy-efficient technologies. Novatlantis. März 2004. Internet:
<http://www.novatlantis.ch/fileadmin/downloads/2000watt/Weissbuch.pdf> [Stand 1.12.2009]
- ecoinvent, 2007 ecoinvent Centre (2007). ecoinvent data v2.01, ecoinvent reports No. 1-25. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, Switzerland, retrieved from: www.ecoinvent.org
- EEX, 2009 European Energy Exchange EEX (2009). Downloads Ergebnisse Stromhandel Intraday – Marktgebiet Deutschland und Ergebnisse Strom – Marktgebiet Schweiz. Internet:
<http://www.eex.com/de/Downloads> [Stand 1.12.2009]
- Engel, 2008 Engel, T. (2008). Plug-in Hybrids: solare Mobilität : Studie zur Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO₂-Emissionen im PKW-Verkehr bei verstärkter Nutzung von elektrischen Antrieben im Zusammenhang mit Plug-in Hybrid Fahrzeugen. Verlag Dr. Hut, München, 2007.
- Entso-e, 2009 Entso-e (2009). ENTSO-E Work Program. Internet:
[http://www.entsoe.eu/index.php?id=186&no_cache=1&sword_list\[\]program](http://www.entsoe.eu/index.php?id=186&no_cache=1&sword_list[]program) [Stand 27.11.2009]
- ETG, 2009 ETG Task Force Energiespeicher (2009). VDE-Studie Energiespeicher im Stromversorgungssystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger. Bedeutung, Stand der Technik. Handlungsbedarf.

- EU, 2006 European Union (2006). Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 on energy end-use efficiency and energy services and repealing Council Directive 93/76/EEC. Internet: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0064:0085:EN:PDF> [Stand 18.01.2010]
- EU, 2009 European Union (2009). Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC. Internet: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:211:0055:0093:EN:PDF> [Stand 27.11.2009]
- EU, 2009a European Union (2009). Regulation (EC) No 714/2009 of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 on conditions for access to the network for cross-border exchanges in electricity and repealing Regulation (EC) No 1228/2003. Internet: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:211:0015:0035:EN:PDF> [Stand 27.11.2009]
- EU, 2009b European Union (2009). Regulation (EC) No 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles. Internet: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0001:0015:EN:PDF> [Stand 27.11.2009]
- Eurostat, 2008 Eurostat (2008). Gross electricity production 2007 for EU-27. Internet: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home> [Stand 27.11.2009]
- Frischknecht & Tuchschmid, 2008 Frischknecht, R. & Tuchschmid, M (2008). Primärenergiefaktoren von Energiesystemen. Version 1.4, 18. Dezember 2008. esu-services. Internet: <http://www.esu-services.ch/cms/fileadmin/download/frischknecht-2008-Energiesysteme.pdf> [Stand 27.11.2009]
- Horbaty & Rigassi, 2008 Horbaty R.& Rigassi R. (2008). Integration von Plug-In-Hybrid Cars zur Förderung intelligenter Verteilnetzstrukturen. ENCO AG, Liestal im Auftrag des Bundesamts für Energie. Internet: http://www.smartgrid.ch/images/SB_Plug_In_Hybrid_2008_1.pdf [Stand 21.12.2009]
- Humm & Lütolf (ed.), 2005 Humm, O. & Lütolf, T. (2005). Leichter leben. Ein neues Verständnis für unsere Ressourcen als Schlüssel zu einer nachhaltigen Entwicklung – die 2000-Watt-Gesellschaft. Novatlantis. Januar 2005. Internet: http://www.novatlantis.ch/fileadmin/downloads/2000watt/leichterleben_dt.pdf [Stand 1.12.2009]
- IEA, 2008 International Energy Agency IEA (2008). Hybrid and electric vehicles. The electric drive gains momentum. International Energy Agency, Hybrid&Electric Vehicle Implementing Agreement.
- Jakob et al., 2009 Jakob, M. et al. (2009). CO₂-Intensität des Stromabsatzes an Schweizer Endkunden. Studie TEP Energy BmbH, Zürich, im Auftrag des Forschungsfonds FOGA und des Forschungsfonds der EV (FEV). Internet: http://www.tepenergy.ethz.ch/docs/IntensitaetStromabsatzSchweizerEndkunden_Bericht_TEP_Energy.pdf [Stand 27.11.2009]
- Kamath, 2009 Kamath, H. (2009). Lithium Ion Batteries for Electric Transportation: Costs and Markets. Electric Power Research Institute. September 22nd, 2009. <http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/2009symposium/presentations/kamath.pdf> [Stand 27.11.2009]

- Keller, 2007 Keller, M. (2007). Der Energieverbrauch des Verkehrs 1990 – 2035, Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten „BIP hoch“, „„Preise hoch“ und „Klima wärmer“. Studie der Infras AG, bern, im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE. Januar 2007. Internet:
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_291097269.pdf [Stand 7.1.2010]
- Lache et al., 2008 Lache, R., Galves D., Nolan, P. (2008). Electric Cars, Plugged In. Deutsche Bank. Global Markets Research. 9 June 2008. Internet: http://www.d-incert.nl/fileadmin/klanten/D-In-cert/webroot/Background_documents/DeutscheBank_Electric_Cars_Plugged_In_June2008.pdf [Stand 7.1.2010]
- Löser et al., 2009 Löser, R. et al. (2009). Autos der Zukunft (Serie, Teile II und III). Spektrum der Wissenschaft. März und April 2009. Internet: <http://www.spektrumverlag.de/artikel/979759> und http://deutsche.nature.wissenschaft-online.de/artikel/983274&_z=798888 [Stand 1.12.2009]
- Pike Research, 2009 Pike Research (2009). Electric Vehicles: 10 Predictions for 2010. Published in partnership with hybridcars.com.
- Pike Research (2009). Plug-In Hybrid Electric Vehicles. The Global Outlook for PHEVs.
- Pike Research (2009). Electric Vehicles on the Grid.
- Roth & Wagner, 2006 Roth, H. & Wagner, U. (2006). Verstärkter Teillastbetrieb thermischer Kraftwerke durch Windstromeinspeisung. ew Jg 105 (2006), Heft 5. Seiten 14-16.
- Schaffner, 2009 Schaffner, C. (2009). Umfrage Stromkennzeichnung 2007. Bundesamt für Energie BFE, Sektion Energieversorgung. 29. Juni 2009. Internet: <http://www.news-service.admin.ch/NSBSSubscriber/message/attachments/16130.pdf> [Stand 27.11.2009]
- Sommer et al., 2003 Sommer, H., Simmen, W., Simmen, H. (2003) Versorgungssicherheit im Bereich Elektrizität. Ecoplan im Auftrag des Bundesamtes für Energie. 10. Juni 2003. Internet: <http://www.news-service.admin.ch/NSBSSubscriber/message/attachments/947.pdf> [Stand 30.11.2009]
- Swissgrid, 2008 Swissgrid (2008). Veröffentlichung SDL Konzept im Internet. V0.8. Bern, 2.12. 2008.
- Swissgrid (2008). Einführung Bilanzgruppen-Modell. Version 1.1. Internet: http://www.swissgrid.ch/power_market/grid_operation/balance_group_model/bg_documents/document/D100303_balance_group_model_intro.pdf/de [Stand 8.7.2010]
- Swissgrid (2008). Informationsveranstaltung Systemdienstleistungen im liberalisierten Markt. Stadttheater Olten, 11. September 2008. Internet: [https://www.swissgrid.ch/company/downloads/document/S080916_Informationsveranstaltung SDL_11-September-2008_Handout.pdf/de](https://www.swissgrid.ch/company/downloads/document/S080916_Informationsveranstaltung	SDL_11-September-2008_Handout.pdf/de) [Stand 30.11.2009]
- Thoma & Niggli, 2009 Thoma, M. & Niggli, P. (2009). Systemdienstleistungen: Ein funktionierender Wettbewerb als Grundlage. Wie Swissgrid die Marktreife bei Systemdienstleistungen misst. Swissgrid. Version 1.6. Internet: http://www.swissgrid.ch/power_market/grid_operation/ancillary_services/as_documents/document/D091218_AS-market-criteria_V1R6.pdf?set_language=de [Stand 7.1.2010]
- TNS / Infratest, 2009 TNS / Infratest (2009). Continental-Studie. Repräsentative Meinungsumfrage im Auftrag der Continental AG, Hannover.

- UCTE, 2009 Union for the Coordination of Transmission of Electricity UCTE (2009). Operation handbook – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance. Final Version (approved by SC on 19 March 2009). Internet:
http://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/ce/oh/Policy1_final.pdf [Stand 30.11.2009]
- UCTE, 2009a Union for the Coordination of Transmission of Electricity UCTE (2009). Memo 2008. provisional values as of 14 April 2009.
http://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/ce/memo_2008.pdf [Stand 7.1.2010]
- Valentine- Valentine-Urbschat, M. & Bernhart, W. (2009). Powertrain 2020 – The Future Drives Electric.
 Urbschat & Bern- Roland Berger Strategy Consultants.
 hart, 2009
- Wietschel, Wietschel, M. (2008, 2009). Zur Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen. Fraunhofer Institut
 2008/9 System- und Innovationsforschung.

8 Experten / Kontakte

Christian Bach, EMPA;
Martin Bolliger, SwissCleanDrive;
Ferdinand Düdenhöffer, Auto-Experte;
Ulrich Höpfner, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg;
Lukas Küng, ewz;
Eva Marie Kurscheid, transpower;
Alexander Küster, Swissgrid;
Wolfgang Lohbeck, Greenpeace;
Peter Scheffler, TU Chemnitz;
Ralph Schnyder, Dreifels;
Wolfgang Schufft, TU Chemnitz
Matthias Stucki, Esu-Services;
Andrea Vezzini BFH;
Georg Wilke, Wuppertal Institut, Forschungsgruppe "Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen";
Dirk Uwe Sauer, RWTH