



Dr. Karl Otto Schallaböck

Prof. Dr. Manfred Fishedick

Strommix beim Betrieb von Elektrofahrzeugen

Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität
im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“
(FKZ 03KP5003)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung

Koordiniert durch:



Wuppertal, im Januar 2012

Inhalt

1. Summary	5
2. Räumliche Abgrenzung	11
3. Zeitliche Abgrenzung.....	12
4. Sachliche Abgrenzung	22
5. Ansätze zu den Messgrößen.....	22
6. Ansätze zum Strommix	24
Versorgung der Elektrofahrzeuge mit regenerativem Strom	26
Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend dem deutschen Stromerzeugungsmix	26
Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom bei einer Betrachtung von Elektrofahrzeuge als zusätzliche Stromverbraucher (Merit-Order Ansatz)	26
7. Ansätze im Rahmen gesamtheitlicher Bilanzierungen	30
8. Ansätze zu den Energieverbräuchen	34
9. Ansätze zu den CO ₂ -Emissionen	39
Status Quo Analyse	39
Perspektivische Betrachtung.....	43
10. Fazit.....	46
11. Literatur	47
Anlage 1	51
Anlage 2	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Spezifische CO ₂ -Emissionen (g CO ₂ /km) im Vergleich von herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen bei unterschiedlichen Stromquellen (eigene Berechnungen)	6
Tabelle 2	Bruttostromerzeugung nach Einsatzenergien in Deutschland 2008, sowie 2020 im Referenzfall (R) und in den Szenarien I – IV A/B entsprechend den Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung gesamt in TWH und nach prozentualer Verteilung auf Energieträger	14
Tabelle 3	Globale Stromerzeugung nach Einsatzenergien nach dem Referenzpfad von US-DoE/EIA: International Energy Outlook 2010, (a) in 1000 TWh, b) nach prozentualer Verteilung	22
Tabelle 4	Kenngößen für die Elektro-PKW-Flotte im Vergleich zur gesamten PKW-Flotte 2010	23
Tabelle 5	Bedarf an konventionellen Kondensationskraftwerken in der Bandbreite der Ausgleichsoptionen.....	29
Tabelle 6	Ableitung des rechnerischen Anteils der Elektrofahrzeuge an der CO ₂ -emissionslimitierten PKW-Neuwagenflotte	33
Tabelle 7	Wirkungsgrad des Betriebs des Kraftwerksparks und des Stromnetzes, Mrd. kWh.....	35
Tabelle 8	Wirkungsgrad der regenerativen Stromerzeugung	36
Tabelle 9	Wirkungsgrad der Stromerzeugung aus Kohle und insgesamt.....	36
Tabelle 10	Spezifische CO ₂ -Emissionen (g CO ₂ /km) im Vergleich von herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen bei unterschiedlichen Stromquellen	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für das Jahr 2010 (Darstellung nach Fahrzeugklassen und -segmenten: Minis/Kleinstwagen und Kleinwagen (kombiniert), Kompakt- und Mittelklasse (kombiniert) und Utilities (leichte Nutzfahrzeuge)	7
Abbildung 2	(a) Bruttostromerzeugung nach Energieträgern im Ausstiegsszenario (links), (b) Verbrennungs-bedingte Treibhausgasemissionen (rechts)	8
Abbildung 3	Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für den Zeitverlauf 2010 bis 2030 am Beispiel der Kompakt- und Mittelklasse (kombiniert).....	9
Abbildung 4	Bruttostromerzeugung in Deutschland 2010 nach Einsatzenergieträgern, insges. 621 TWh	11
Abbildung 5	Ausgleich des zwischen 2010 und 2011 rückläufigen Stromerzeugungsbeitrags aus der Kernenergie (32,6 TWh)	12
Abbildung 6	Bruttostromerzeugung nach Einsatzenergien in Deutschland 2008 sowie 2020 im Referenzfall (R) und in den Szenarien I – IV A/B entsprechend den Energieszenarien für ein Energiekonzept 2010 der Bundesregierung a) in TWH und b) nach prozentualer Verteilung.....	13

Abbildung 7	(a) Bruttostromerzeugung nach Energieträgern im Ausstiegsszenario (links), (b) Verbrennungs-bedingte Treibhausgasemissionen (rechts)	14
Abbildung 8	Veränderungen der deutschen Stromerzeugungsbilanz der Jahre 2011 bis 2013 gegenüber der Situation im Jahr 2010	16
Abbildung 9	Zusätzliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gegenüber 2010 nach verschiedenen Szenarien bzw. Ausbauzielen.....	17
Abbildung 10	Stromerzeugungsbilanz in Deutschland – Szenario „Fossil-niedrig“ (2000 bis 2025)	18
Abbildung 11	Stromerzeugungsbilanz in Deutschland – Szenario „Fossil-hoch“ (2000 bis 2025)	19
Abbildung 12	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland – Szenarien „Fossil-niedrig“ und „Fossil-hoch“ (1990 bis 2025)	20
Abbildung 13	Globale Stromerzeugung nach Einsatzenergien nach dem Referenzpfad von US-DoE/EIA: International Energy Outlook 2010, (a) in 1000 TWh, (b) nach prozentualer Verteilung	21
Abbildung 14	Gemessene Ladevorgänge im Rahmen der Begleitforschung	28
Abbildung 15	Quantifizierung der zusätzlich integrierten Offshore-Windstromzeugung in das Netz durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen (BEI 2011)	28
Abbildung 16	Auswertung der Anteile von Grund- mittel- und Spitzenlast der verbleibenden Residuallast im Basisszenario 2010 A, welcher von konventionellen Kondensations-KW zu decken ist (Mittelwerte über 4 Wetterjahre 2006-2009)	30
Abbildung 17	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen	32
Abbildung 18	Einsatz von Energieträgern zur Stromerzeugung, Deutschland 1990-2009, in PJ	34
Abbildung 19	Spezifische gemessene durchschnittliche Stromverbräuche der Demonstrationsfahrzeuge	37
Abbildung 20	Spezifische Energie-/Stromverbräuche der Demonstrationsfahrzeuge in der Klasse Minis und Kleinwagen	38
Abbildung 21	Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2009 und erste Schätzung 2010 im Vergleich zu CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung.....	40
Abbildung 22	Übersicht CO ₂ -Gehalte bei regenerativer Stromerzeugung	41
Abbildung 23	Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen nach unterschiedlichen Methoden am Beispiel von Kleinwagen	42
Abbildung 24	Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für das Jahr 2010 (Darstellung nach Fahrzeugklassen und -segmenten: Minis/Kleinstwagen und Kleinwagen (kombiniert), Kompakt- und Mittelklasse (kombiniert) und Utilities (leichte Nutzfahrzeuge)	43
Abbildung 25	Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für den Zeitverlauf 2010 bis 2030 am Beispiel der Kompakt- und Mittelklasse (kombiniert).....	45

1. Summary

Als entscheidend für die Klimabe- bzw. -entlastung und den Vergleich mit herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen erweisen sich die CO₂-Emissionen, die aufgrund der Stromerzeugung dem Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge zuzurechnen sind. Die angemessene Zuordnung der CO₂-Emissionen ist allerdings nicht offensichtlich und unstrittig, sondern abhängig von der Betrachtungsweise. Hierbei ist zunächst zu unterscheiden zwischen:

- einer Zurechnung von CO₂-Emissionen auf Basis des konkreten Stromverbrauchs der Elektrofahrzeuge sowie der dahinter liegenden Stromerzeugung und
- einer Betrachtungsweise, die sich auf bilanzielle Zurechnungen im Rahmen eines definierten Gesamtsystems (z.B. Deutschland oder die EU) entsprechend den bestehenden regulatorischen Bilanzansätzen bezieht.

Letztere Betrachtung führt zu dem Ergebnis, dass Elektrofahrzeugen keine eigenständigen CO₂-Emissionen zuzurechnen sind: Die gesamten CO₂-Emissionen der Stromerzeugung sind im Rahmen des Cap&Trade-Regimes des Europäischen Emissionshandelssystems (European Emission Trading Scheme) limitiert¹. Menge und Art der Stromerzeugung (und -abnahme) verändern diesen Wert nicht, d.h. eine zusätzliche Nachfrage nach Strom etwa über den Einsatz von Elektrofahrzeugen führt in diesem System zu keinen Veränderungen der CO₂-Emissionen. Wieweit zur genauen Einhaltung der im Rahmen des Emissionshandelssystems limitierten Emissionsrechte Zertifikate zugekauft oder verkauft werden und wer die jeweiligen Partner dieser Handelsvorgänge sind, bleibt für die insgesamt dem Stromsektor zugerechnete Emissionsmenge unbedeutend.

Die zuvor skizzierte Betrachtungsweise ist für die Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen unter systemanalytischen Gesichtspunkten und vor dem Hintergrund der geltenden energie- und klimapolitischen Regelungen grundsätzlich sinnvoll, erfordert aber bei der Analyse der erzielbaren Nettoeffekte eine Ausweitung der Systemgrenze. Insbesondere ist es notwendig, die – aktuell mögliche – Anrechnung der Elektrofahrzeuge im Rahmen der europäischen Flottenverbrauchslimits zu berücksichtigen. Konkret bedeutet dies:

- sofern die Flottenverbrauchsgrenzen inklusive der Elektrofahrzeuge eingehalten werden, ergeben sich praktisch keine Auswirkungen der Elektrofahrzeuge auf die tatsächlichen CO₂-Emissionen aus dem Verkehr.
- werden die Flottenverbrauchsgrenzen hingegen ohne Elektrofahrzeuge erreicht, kommt es durch die Elektrofahrzeuge zu einer Verminderung der tatsächlichen CO₂-Emissionen aus dem Verkehr.

Konzentriert man sich auf die im vorliegenden Vorhaben auftragsgemäß im Kern zu betrachtende Fragestellung, wie sich die konkreten Fahrten der Elektrofahrzeuge mit ihrem Stromverbrauch und den darauf direkt entfallenden Erzeugungsketten auf die CO₂-Emissionen auswirken, gibt es keine einfache Antwort. Vielmehr werden in der Literatur und in der öffentlichen Debatte (vgl. z.B. die Vorträge auf dem 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility, 6th of April 2011, ETH Zürich) unterschiedliche Vorstellungen

¹ Nach Vorgaben des Europäischen Emissionshandelssystems müssen die Treibhausgasemissionen aus dem Bereich der Energiewirtschaft von 2005 bis 2020 um rd. 21% reduziert werden. Entsprechend der geltenden Richtlinie geht die EU für den Zeitraum nach 2020 (d.h. nach dem Ende der jetzt fixierten Verpflichtungsperiode) von einer linear fortschreitenden Reduktion des caps von 1,74 %/a aus (vgl. Directive 2009/29/EC).

über die Zuordnung vertreten, da eine physikalisch eindeutige Zuweisung einer bestimmten Stromerzeugung einerseits zu einer bestimmten Stromverwendung andererseits in der Regel schwierig ist. Da die unterschiedlichen Zuweisungskonventionen zu weit auseinander liegenden Ergebnissen führen, greift nachfolgende Analyse alle Ansätze auf und macht damit die Unterschiede transparent. Dabei wird unterschieden zwischen:

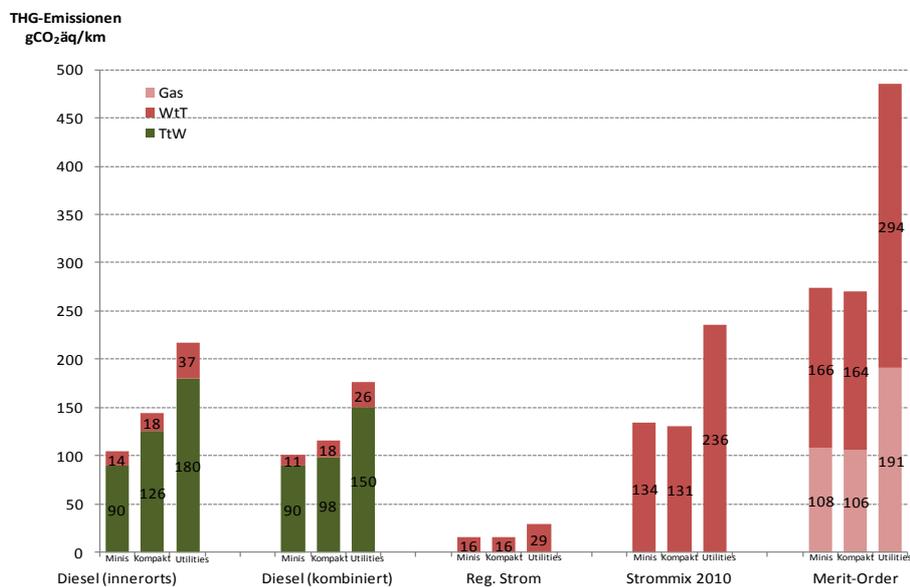
- der vollständigen Versorgung der Elektrofahrzeuge mit erneuerbarem Strom (allgemein angestrebt und in den Modellregionen teils durch hohe Anforderungen an die Zertifizierung des Ladestroms gestützt; vgl. hierzu u.a. die Strombezugsrichtlinie für Elektrofahrzeuge für die Modellregion Hamburg),
- der Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend dem derzeitigen deutschen Strommix und
- der Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend der bei ökonomischem Betrieb anzusetzenden zusätzlichen Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge als zusätzliche Stromverbraucher.

Die unterschiedlichen Verfahren stellen letztlich Bewertungen im Rahmen bestimmter Kontexte dar, die je nach Perspektive jeweils für sich einen hohen Grad von Nachvollziehbarkeit aufweisen und für die Praxis unterschiedlich geeignet sind. Ein Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen lässt damit eine ganzheitliche Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen zu. Die quantitativen Ergebnisse der Fahrzeugvergleiche in den auswertbaren Fahrzeugsegmenten zeigen die nachfolgende Tabelle und korrespondierende Abbildung für den heutigen Status (Stand 2010). Den unteren Grenzwert stellt die „reine Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien“ dar. Als oberer Grenzwert wird zu theoretischen Vergleichszwecken die „Bewertung nach der Merit-Order Methode“ und hier im doppelten Sinne als obere Bandbreite die Betrachtung eines Kohlekraftwerks als Grenzkraftwerk herangezogen.

Tabelle 1 Spezifische CO₂-Emissionen (g CO₂/km) im Vergleich von herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen bei unterschiedlichen Stromquellen (eigene Berechnungen)

	herkömmlicher Antrieb		Elektrofahrzeug			
	innerorts	kombiniert	Regenerativ	Mix 2010	Merit Order Kohle	Merit Order Gas
Minis/Kleinwagen	104	101	16	134	274	108
Kompakt-/Mittelklasse	144	116	16	131	270	106
Utilities	217	176	29	236	485	191

Abbildung 1 Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für das Jahr 2010 (Darstellung nach Fahrzeugklassen und -segmenten: Minis/Kleinstwagen und Kleinwagen (kombiniert), Kompakt- und Mittelklasse (kombiniert) und Utilities (leichte Nutzfahrzeuge))



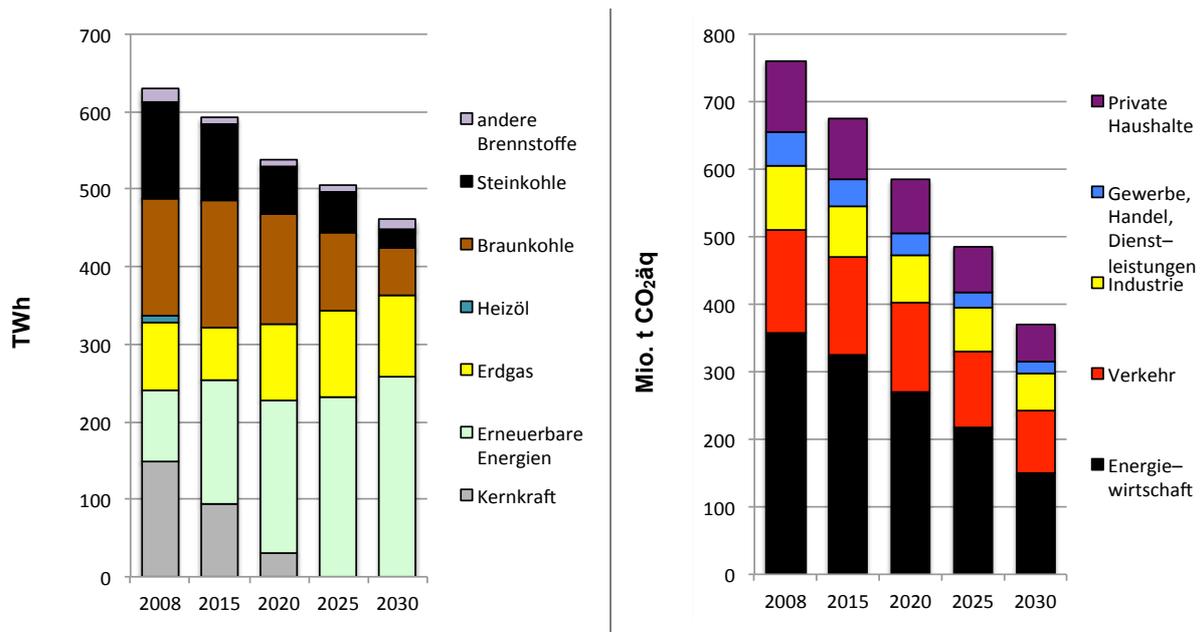
Legende: WtT = Well to Tank; TtW = Tank to Wheel; Gas = Gasanteile innerhalb Merit-Order; Minis = Minis/Kleinstwagen; Kompakt = Kompakt- und Mittelklasse; Utilities = leichte Nutzfahrzeuge.

Erläuterung der Abbildung: Der regenerative Pfad ist der sinnvolle und perspektivisch anzustrebende Pfad der Stromerzeugung. Er reduziert die CO₂-Emissionen beispielsweise im Innerstädtischen Verkehr um den Faktor 6-9 (je nach Fahrzeugklasse, Vergleich der Realdaten innerhalb der Modellregionen mit Zyklusdaten konventioneller Fahrzeuge). Innerhalb des Strommix-Pfades fallen CO₂-Emissionen nahezu in der Größenordnung konventioneller Fahrzeuge an. Dies gilt auch für eine Verschiebung in Richtung gasbasierter Kapazitäten. Mit zunehmender Anzahl an Elektrofahrzeugen und der vermehrten Integration Erneuerbarer Energien in den Kraftwerkspark erhöhen sich die positiven Klimaeffekte deutlich (s. auch perspektivische Annahmen zur Stromerzeugung für 2020 und 2030). Auch mit deutschem Strommix leisten Elektrofahrzeuge zukünftig einen Klimaschutzbeitrag.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist – neben deren Bandbreite und den nicht unerheblichen Unsicherheitsmargen – zu berücksichtigen, dass die absoluten Mengen der rechnerischen Mehr- oder Minderbelastungen gegenwärtig wegen der geringen Zahl von Elektrofahrzeugen als weitgehend bedeutungslos anzusehen ist. Dies trifft in großem Umfang auch noch für 2020 zu, wenn die Anzahl der Elektrofahrzeuge zwar nach den Zielen der Bundesregierung deutlich auf 1 Mio. erhöht wird, aber gleichwohl nur etwa 2 Prozent des Fahrzeugbestands ausmacht. Hinsichtlich des Stromverbrauchs ist der Anteil der Elektrofahrzeuge noch geringer. Er dürfte auch im Jahr 2020 noch deutlich unter einem halben Prozent des gesamten inländischen Stromverbrauchs liegen. Die Bewertung für das Jahr 2010 ist daher eine Momentaufnahme und nicht gleichzusetzen mit der Klimarelevanz von Elektrofahrzeugen in einem potenziellen zukünftigen Massenbetrieb in einer Zeit, in der auch der Energiemix für die Strombereitstellung verändert sein wird.

Während die Angaben für den Status Quo mit empirischen Daten belegt werden können, sind für die weitere Perspektive Annahmen zu treffen bzw. Bezüge zu heute vorliegenden Szenarien notwendig. Als maßstabbildend hierfür kann derzeit das sogenannte „Ausstiegsszenario“ in den Energieszenarien 2011 von Prognos/EWI/GWS angesehen werden. Die dort vorgesehene Entwicklung der Stromerzeugung und der Treibhausgas-Emissionen zeigen die nachfolgenden Abbildungen.

Abbildung 2 (a) Bruttostromerzeugung nach Energieträgern im Ausstiegsszenario (links), (b) Verbrennungs-bedingte Treibhausgasemissionen (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung nach Prognos/EWI/GWS (2010).

Durch den Kernenergieausstieg und den zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien ändert sich der Strommix bis zum Jahr 2020 bereits deutlich. Allerdings tragen auch fossile Kraftwerke noch in bedeutendem Umfang zur Stromerzeugung bei.

Für die Rahmenannahmen der hier betrachteten Bewertungsmethoden bedeutet dies folgendes: Erneuerbarer Strom bleibt bei dem zu erwartenden Mix (mit sehr hohen Windenergieanteilen) sehr emissionsarm. Für die spezifischen Emissionen des nationalen Strommixes resultiert dem „Ausstiegsszenario“ folgend bis 2020 ein signifikanter Rückgang gegenüber dem Jahr 2010. Der Merit-Order-Strom bewegt sich deutlich auf eine Gasstromerzeugung, je nach Einsatzweise der Elektrofahrzeuge ggf. auch bereits auf eine teilweise erneuerbare Stromerzeugung zu.

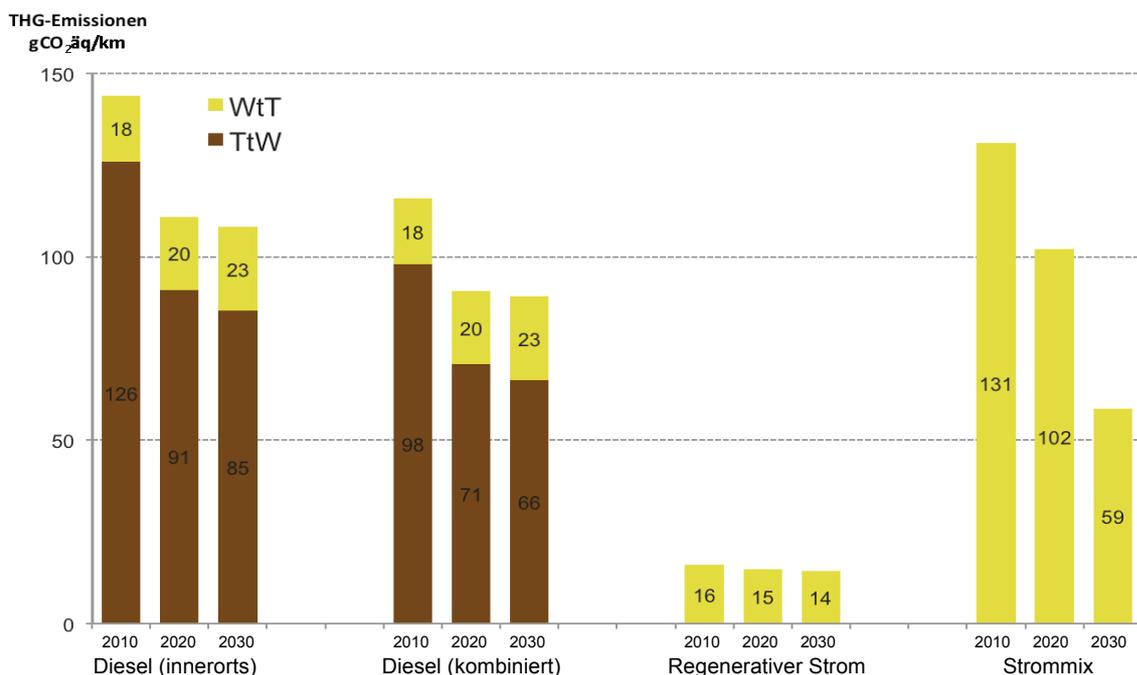
Auch jenseits des Strommixes sind für den Vergleich Annahmen zu treffen. Für die Energieeffizienz der Batteriefahrzeuge können Verbesserungen durch Konzeptoptimierungen und ein optimiertes Zusammenspiel der Komponenten erwartet werden. Die Energieumsetzungen im Elektromotor selber sind allerdings bereits nahe der physikalischen Grenze ausgereizt. Bei den herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen ist in der Vorkette der Treibstoffbereitstellung einerseits eine leichte Verschlechterung durch einen steigenden Zugriff auf schlechtere Lagerstätten (mit höherem Energieaufwand für die Produktion) zu erwarten, andererseits eine leichte Verbesserung durch höhere Beimischungsanteile erneuerbarer Kraft-

stoffe. Fahrzeugseitig ist bei Umsetzung des EU-Zielwerts von 95 g CO₂/km für die Neufahrzeuge 2020 eine erhebliche Absenkung gegenüber 2010 (Durchschnitt Deutschland: 151,7 g CO₂/km) zu erwarten, wobei davon auszugehen ist, dass ein Teil der Absenkung durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen selber realisiert wird.

Für 2030 und danach kann sich die Entwicklung deutlich modifiziert darstellen: Beim Strommix ist eine zunehmende Dominanz erneuerbarer Erzeugung zu erwarten, wodurch eine weitere schrittweise CO₂-Minderung erreicht wird. Die Grenzstromerzeugung dürfte weitgehend auf Gas-Kraftwerken und bei gezielten Ladevorgängen der Elektrofahrzeuge vermehrt dann auch auf erneuerbarem Strom beruhen. Bei den herkömmlichen Fahrzeugen ist davon auszugehen, dass es zu einer weiteren signifikanten Erhöhung des CO₂-Ausstoßes der fossilen Vorkette der Treibstoffbereitstellung kommen wird. Eine langfristig stärkere Einbindung erneuerbarer Kraftstoffe (z.B. synthetisches Methan oder andere Kraftstoffe aus der Wirkungskette Windstrom-Elektrolyse-Wasserstoff-Kraftstoff Synthetisierung) könnte diesen Effekt allerdings ganz oder teilweise kompensieren.

Nachfolgende Abbildung stellt am Beispiel der Kompaktklasse die Ergebnisse der Emissionsbilanz im Zeitverlauf gegenüber, wobei sich die Betrachtung auf die Analyse der Strombezugsgröße erneuerbare Energien und Strommix beschränkt.

Abbildung 3 Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für den Zeitverlauf 2010 bis 2030 am Beispiel der Kompakt- und Mittelklasse (kombiniert)



Quelle: Eigene Darstellung. Wesentliche Berechnungsannahmen: Entwicklung Strommix nach Prognos/EWI/GWS 2011. Effizienzsteigerung konventioneller Fahrzeuge bis 2020 nach eigenen Annahmen 3 %/a (nach 2020: 0,5 %/a). Erhöhung Biokraftstoffanteil gemäß BMU Leitszenario bis 2020 auf 9,7 % und bis 2030 auf 12,4 %. Erhöhung der spezifischen Emissionen der vorgelagerten Prozesskette Öl gemäß eigener Abschätzung um 10 % bis 2020 und 15 % zwischen 2020 und 2030. Effizienzsteigerung Elektrofahrzeuge nach eigenen Annahmen bis 2020 1 %/a (nach 2020: 0,25 %/a).

Die Abbildung verdeutlicht die weiter sehr positive Klimabilanz der Elektrofahrzeuge für den Fall, dass die Fahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Soweit nach 2020 die erneuerbare Stromerzeugung über das Maß der ausgeschleiften nuklearen

Stromerzeugung hinaus zunehmend weitere Anteile an der gesamten Stromerzeugung übernimmt, was aus heutiger Sicht zu erwarten und politisch klar intendiert ist, wird sich das Verhältnis auch bei der Zugrundelegung des Strommixes als Bewertungsgröße zugunsten der Elektrofahrzeuge deutlich verändern. Bei einer für 2050 teils angestrebten sehr weitgehenden Stützung der Stromerzeugung auf erneuerbare Quellen (im Energiekonzept der Bundesregierung werden Anteile von mind. 80% am Strombedarf für das Jahr 2050 genannt) nähert sich der CO₂-Wert im Stromerzeugungsmix demjenigen der reinen erneuerbaren Erzeugung perspektivisch immer weiter an.

Fazit: Fasst man die vorgenannten Aspekte zusammen, lässt sich folgendes feststellen:

In der Literatur finden sich für die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen unterschiedliche Bewertungsmethoden, deren Ergebnisse kurzfristig stark streuen und sich erst mittel- bis längerfristig perspektivisch annähern. Werden Elektrofahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben, ist ihre Klimabilanz deutlich besser als diejenige fossil betriebener PKW. Wann, inwieweit und unter welchen Voraussetzungen (Herkunftsnachweis) eine direkte Zuordnung des Fahrstroms zu einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien möglich ist, ist heute allerdings umstritten. Unter pragmatischen Gesichtspunkten bietet die Strommixmethode eine gute Orientierung für die klimabezogene Bewertung von Elektrofahrzeugen. Aufgrund der auf der Zeitachse zunehmenden Anteile erneuerbarer Energien im Strommix führt dies für die Zeiten, in denen eine signifikante Durchdringung mit Elektrofahrzeugen zu erwarten ist, zu einer gegenüber heute deutlichen Verbesserung der spezifischen CO₂-Emissionen und respektive Vorteilen gegenüber mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen. Auf der Zeitachse ist allerdings zu beachten, dass auch andere Kraftstoffe auf der Basis von regenerativ erzeugtem Strom (z.B. regenerativer Wasserstoff oder unter Berücksichtigung eines weiteren Umwandlungsschrittes auch synthetisches regeneratives Methan) in den Markt eingeführt werden können und sich hierdurch eine interne Konkurrenzsituation entwickelt.

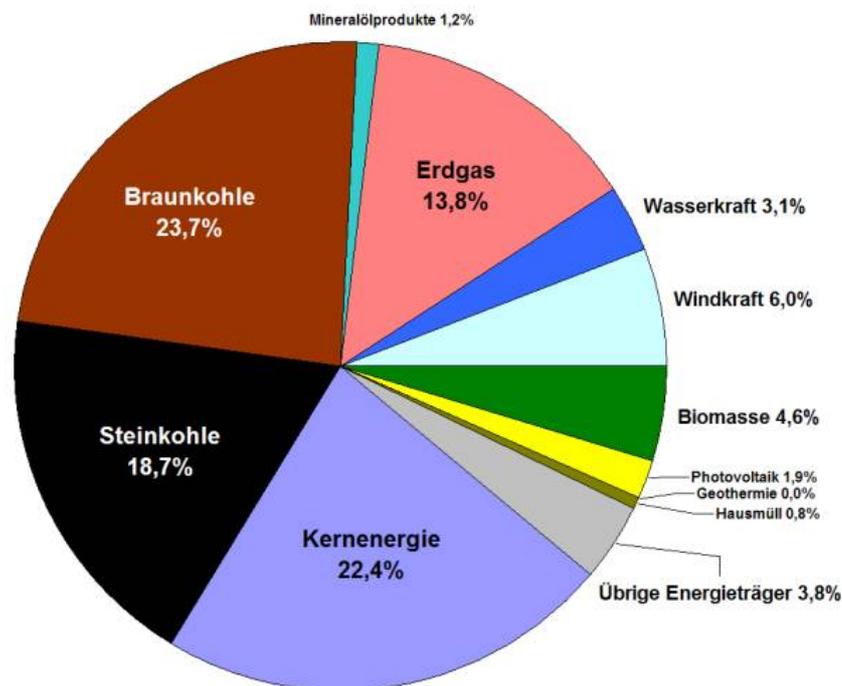
Führt man eine Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen aus Systemsicht unter Berücksichtigung der regulatorischen Rahmenbedingungen durch (Europäisches Emissionshandelssystem), können den Elektrofahrzeugen rechnerisch CO₂-Emissionen von Null zugewiesen werden, zumindest solange die Einhaltung der ebenso von der EU vorgegebenen Flottenverbrauchsgrenzwerte ohne Elektrofahrzeuge erreicht werden.

2. Räumliche Abgrenzung

Gegenstand der Untersuchung ist die Begleitung des Forschungsprogramms „Modellregionen Elektromobilität“ in Deutschland. Entsprechend wird als *Bezugsraum Deutschland* gewählt.

Hinsichtlich der Stromerzeugung nach eingesetzten Energieträgern zeichnet sich Deutschland durch einen breiten Energieträgermix und einen relevanten Anteil regenerativer Energieträger aus.

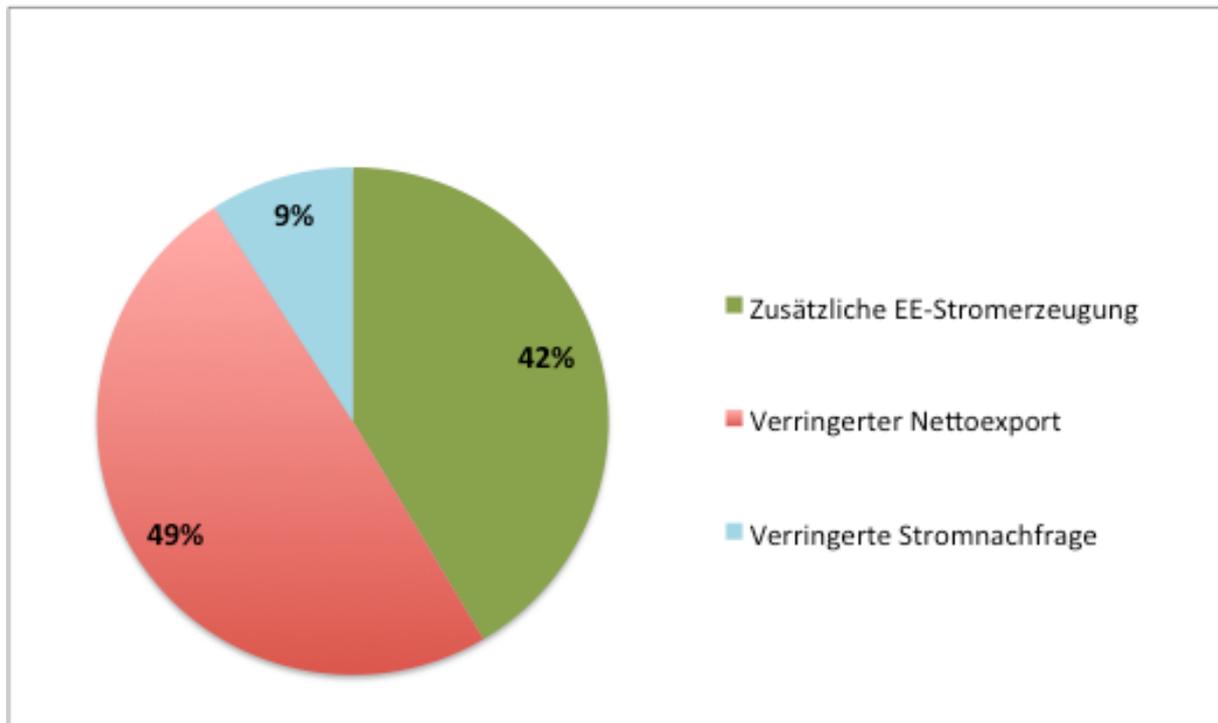
Abbildung 4 Bruttostromerzeugung in Deutschland 2010 nach Einsatzenergieträgern, insges. 621 TWh



Quelle: AG Energiebilanzen, Stand 17.12.2010, vorläufige Werte; www.ag-energiebilanzen.de, Download 17.01.2011; Grafik eigene Darstellung.

Mit der Entscheidung der Bundesregierung im Frühjahr 2011 bis zum Jahr 2022 vollständig aus der Kernenergie auszusteigen (und 8 der 17 in Betrieb befindlichen Reaktoren sofort stillzulegen) ist schon unabhängig von z.B. Klimaschutzinduzierten Maßnahmen eine signifikante Veränderung des Stromerzeugungsmixes zu erwarten. Hinsichtlich der Klimabilanz der Stromerzeugung ist bei einer rein nationalen erzeugungsseitigen Betrachtung dabei maßgeblich, wodurch der derzeitige Kernenergiebeitrag substituiert wird. Nach bisher für das Jahr 2011 vorliegenden Zahlen erfolgte die Substitution der acht sofort stillgelegten Anlagen primär durch eine Verringerung des Stromexportes aus Deutschland heraus sowie eine deutliche Erhöhung des Stromerzeugungsbeitrags erneuerbarer Energien. Zumindest für das Jahr 2011 ist damit nicht wie befürchtet der Teilausstieg aus der Kernenergie durch einen substantiellen Anstieg der fossilen Stromerzeugung erkaufte worden. Im Gegenteil sank in 2011 die fossile Stromerzeugung sogar gegenüber dem Jahr 2010 um rd. 3,2 TWh. Diese Tendenz dürfte sich vermutlich bis zum Jahr 2013 fortsetzen (vgl. Abbildung 8).

Abbildung 5 Ausgleich des zwischen 2010 und 2011 rückläufigen Stromerzeugungsbeitrags aus der Kernenergie (32,6 TWh)



Quelle: nach BDEW Daten (vorläufige Schätzung Dezember 2011); Grafik eigene Darstellung.

3. Zeitliche Abgrenzung

Einer Begleitforschung sind Kennwerte zugrunde zu legen, die nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich zur begleiteten Forschung passen. Das Forschungsprogramm läuft über die Kalenderjahre 2010/2011; für eine zeitnahe Bearbeitung kann die Begleitforschung allerdings die Verfügbarkeit der benötigten Kennwerte für das Jahr 2011 nicht abwarten. Da die strukturellen Größen, die die Kennwerte bestimmen, sich im Zeitverlauf lediglich vergleichsweise langsam verändern, können jedoch die entsprechenden *Kennwerte für das Jahr 2010* in der Regel als zureichende Beurteilungsbasis verwendet werden. Auf diese Werte, die gegenwärtig in vorläufiger Form und mit gewissen Einschränkungen vorliegen, wird weiter unten genauer eingegangen.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die zu erwartenden umweltseitigen Wirkungen der Elektrofahrzeuge für das Jahr 2011 aufgrund der begrenzten Anzahl der Fahrzeuge sehr gering sein werden, so dass vor allem Perspektivbetrachtungen für die Jahre 2020 und 2030 mit dann voraussichtlich deutlich höheren Marktanteilen von Elektrofahrzeugen Aufschluss über die potenzielle Umweltwirkung geben müssen. Dafür ist die Ebene der empirisch verfügbaren Daten zu verlassen und mit Hilfe von Szenariobetrachtungen der Versuch zu machen, die notwendigerweise hohen Unsicherheiten bei Zukunftsbetrachtungen abzubilden. Im Rahmen dieser Untersuchung wird dabei eine Diskussion der Zieljahre 2020 und 2030 für angemessen gehalten.

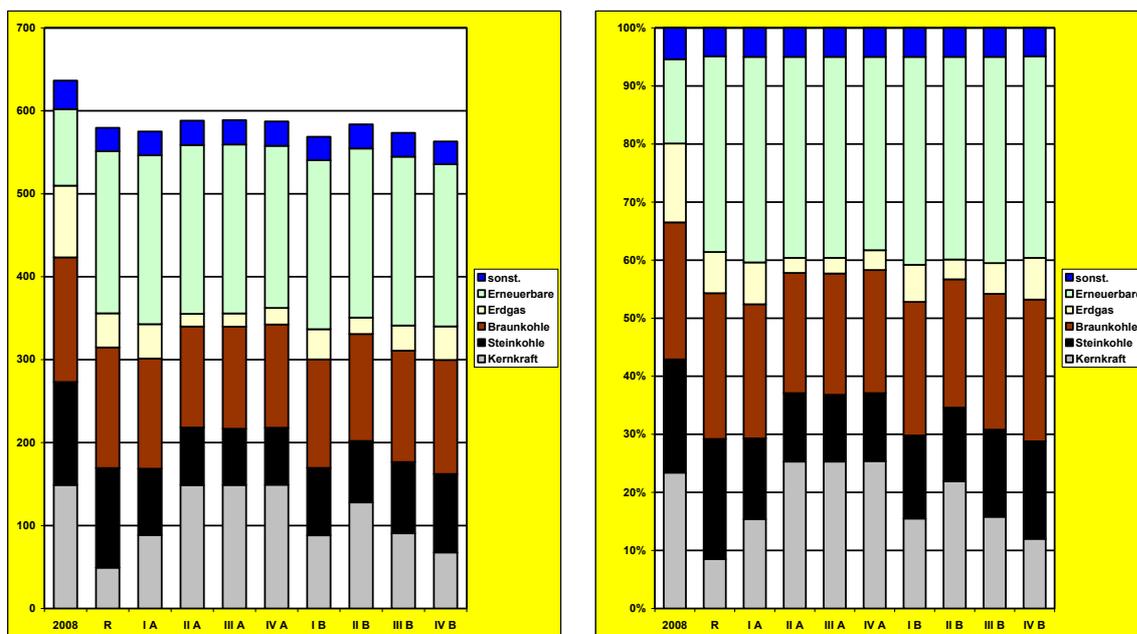
Auf den grundsätzlich hypothetischen Charakter einer solchen Betrachtung wird ausdrücklich hingewiesen; aktuell ergeben sich spezifische Unsicherheiten vor allem aufgrund des im poli-

tischen Raum einhellig vertretenen Bedarfs einer Neuorientierung der politischen Rahmenbedingungen für die Stromerzeugung auf der Grundlage der Entscheidung ab dem Jahr 2022, auf die Nutzung der Kernenergie für die Stromerzeugung vollständig zu verzichten. Das Ergebnis einer solchen Neubewertung ist allerdings gegenwärtig quantitativ noch nicht bestimmbar, vielmehr kursieren im öffentlichen Diskurs eine zunehmende Anzahl von qualitativ und in der Ausprägung unterschiedlichen Vorstellungen über die tatsächlich im konkreten Zeitverlauf konkret anzustrebenden Modifikationen.

Um diese Diskussion nachzuzeichnen, ist der folgenden Abbildung und der nachfolgenden Tabelle zunächst die Gliederung der Stromerzeugung nach Energieträgern in den Jahren 2008 und 2020 nach den „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ von Prognos/EWI/GWS 2010 dargestellt. Diese Szenarien stellten die Grundlage für das Langfristenergiekonzept der Bundesregierung dar, das im September 2010 veröffentlicht worden ist und zunächst von einer Verlängerung der Laufzeit der Kernkraftwerke ausging.

Bemerkenswert an den Szenarien ist eine in jedem betrachteten Fall signifikante Reduktion der gesamten Stromerzeugung gegenüber 2008 (wie übrigens auch gegenüber 2010) und eine signifikante absolute und relative Erhöhung bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern. In den verschiedenen Szenarien wird für das Jahr 2020 die absolute Höhe der Stromerzeugung mit etwa 580 TWh und der Anteil der regenerativen Energieträger mit etwa 35 Prozent nicht deutlich unterschiedlich gesehen; dagegen unterscheidet sich der Split zwischen fossilen Energieträgern (weitgehend Kohlen) und Kernenergie deutlich.

Abbildung 6 Bruttostromerzeugung nach Einsatzenergien in Deutschland 2008 sowie 2020 im Referenzfall (R) und in den Szenarien I – IV A/B entsprechend den Energieszenarien für ein Energiekonzept 2010 der Bundesregierung a) in TWh und b) nach prozentualer Verteilung



Quelle: Prognos/EWI/GWS: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, 27. August 2010, S. 17-25; tw. eigene Berechnungen, eigene Darstellung.

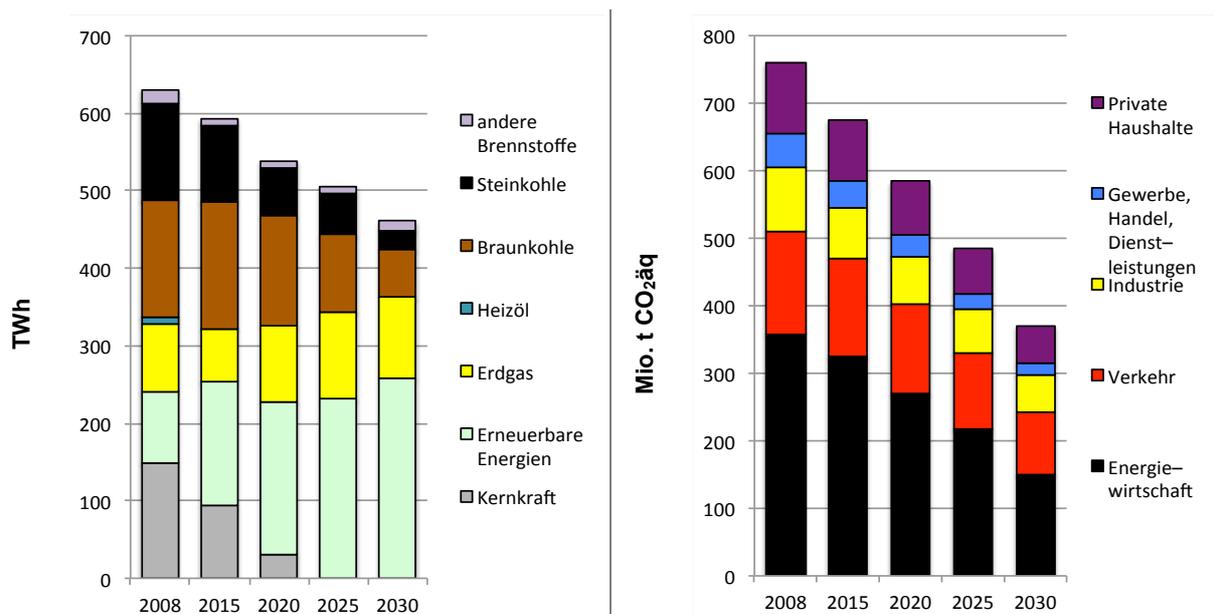
Tabelle 2 Bruttostromerzeugung nach Einsatzenergien in Deutschland 2008, sowie 2020 im Referenzfall (R) und in den Szenarien I – IV A/B entsprechend den Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung gesamt in TWh und nach prozentualer Verteilung auf Energieträger

Jahr	Basis 2008	Szenarien								
		Ref	I A	II A	III A	IV A	I B	II B	III B	IV B
gesamt, TWh	636,5	579,6	575,1	588,1	588,9	587,2	568,8	583,7	573,4	563,1
davon in %										
Kernkraft	23,4	8,5	15,4	25,3	25,3	25,4	15,5	21,9	15,8	12,0
Steinkohle	19,5	20,7	13,9	11,8	11,5	11,7	14,3	12,7	15,0	16,8
Braunkohle	23,6	25,1	23,1	20,7	20,9	21,2	23,0	22,1	23,4	24,4
Erdgas	13,6	7,1	7,2	2,6	2,7	3,4	6,4	3,4	5,3	7,2
Erneuerbare	14,5	33,7	35,4	34,6	34,6	33,3	35,8	34,9	35,5	34,7
Sonstige	5,4	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9

Quelle: Prognos/EWI/GWS: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, 27. August 2010, S. 17-25; Sonstige als Rest auf 100 % ermittelt.

Mittlerweile liegen weitere Szenarioanalysen für die Bundesregierung vor, die die Ausstiegsschlüsse aus der Kernenergie aufgreifen. Als maßstabbildend hierfür kann derzeit das sogenannte „Ausstiegsszenario“ in den Energieszenarien 2011 von Prognos/EWI/GWS angesehen werden. Die dort vorgesehene Entwicklung der Stromerzeugung und der Treibhausgas-Emissionen zeigen die nachfolgenden Abbildungen.

Abbildung 7 (a) Bruttostromerzeugung nach Energieträgern im Ausstiegsszenario (links), (b) Verbrennungs-bedingte Treibhausgasemissionen (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung nach Prognos/EWI/GWS (2010).

Durch den Kernenergieausstieg und den zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien ändert sich der Strommix bis zum Jahr 2020 bereits deutlich. Allerdings tragen aber auch die fossi-

len Kraftwerke noch im erheblichen Umfang zur Stromerzeugung bei. Bis 2030 ergibt sich eine weitere Reduktion des Strombedarfs respektive der heimischen Stromerzeugung und eine weitere deutliche Verschiebung zu den erneuerbaren Energien im Stromerzeugungsmix.

Während derartige Analysen mit hohen Unsicherheiten verbunden sind, liegen wie bereits im vorhergehenden Kapitel dargelegt mittlerweile zumindest vorläufige Energiebilanzen und Marktdaten für das Jahr 2011 vor, die nachzeichnen, zu welchen kurzfristigen Reaktionen der sofort umgesetzte Teilausstieg aus der Kernenergie geführt hat. Dabei haben sich viele der in der politischen Auseinandersetzung um die Nutzung der Kernenergie geäußerten Befürchtungen bisher nicht eingestellt. Deutschland wird über das Jahr 2011 gesehen voraussichtlich weiterhin (wenn auch in deutlich geringerem Maße als in den letzten Jahren) Nettoexporteur von Strom sein, die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland könnten 2011 sogar etwas niedriger liegen als im Vorjahr und die Preise an der Strombörse sind den veröffentlichten Marktdaten zufolge in den Frühjahrsmonaten nur vorübergehend gestiegen.

Eigene Analysen für die mögliche Entwicklung in den kommenden Jahren zeigen zudem, dass dies keine Momentaufnahme sein muss, sondern dass der Kernenergieausstieg – bilanziell gesehen – voraussichtlich bereits ab 2013 alleine durch eine erhöhte regenerative Stromerzeugung kompensiert werden kann. Bereits Mitte des nächsten Jahrzehnts könnte – nach Abschätzungen aus der Leitstudie des BMU - zudem mehr als die Hälfte der Stromerzeugung Deutschlands aus erneuerbaren Energien stammen.

Kurzfristig fehlt dem deutschen Strommarkt die Erzeugungskapazität der acht Kernkraftwerke, die seit Mitte März 2011 dauerhaft abgeschaltet sind². Um zu ermitteln, welche Auswirkungen durch diesen Umstand kurzfristig bis 2013 zu erwarten sind, wird die erwartete Entwicklung der Stromerzeugung und Stromnachfrage und deren Deckung in den Jahren 2011 bis 2013 mit der Situation des Jahres 2010 verglichen.

Nach vorläufigen Angaben (z. T. Schätzungen für die Monate November und Dezember) des BDEW (2011) wird Deutschland 2011 einen Nettoexportüberschuss in Höhe von etwa 5 TWh aufweisen, gegenüber knapp 18 TWh im Vorjahr.³ Gleichzeitig ist die erneuerbare Stromerzeugung gegenüber dem Vorjahreszeitraum deutlich angestiegen, während der fossile Stromerzeugungsbeitrag rückläufig war. Die Stromnachfrage wird nach den vorläufigen Daten zudem rund 0,6 % niedriger liegen als 2010.

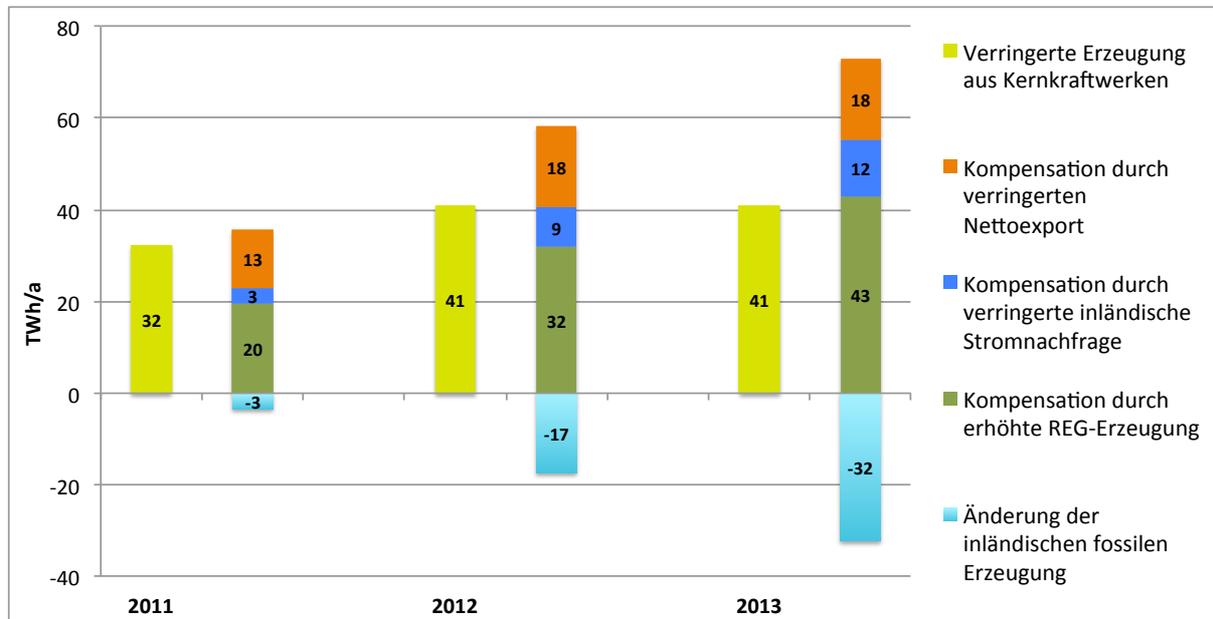
Für eine Beurteilung der Jahre 2012 und 2013 wird für die erneuerbare Stromerzeugung sowie die Stromnachfrage die aktuelle, im Auftrag der Übertragungsnetzbetreiber erstellte

² Im Jahr 2010 befanden sich nur sechs dieser acht Kernkraftwerke im Leistungsbetrieb. Im Jahr 2010 haben die 15 im Leistungsbetrieb befindlichen Kernkraftwerke rund 141 TWh (brutto) erzeugt, während im Jahr 2011 voraussichtlich nur etwa 109 TWh erzeugt wurden (BDEW 2011). Unter der Annahme einer Auslastung der verbleibenden neun Kernkraftwerke, die ihrer typischen Auslastung in der Vergangenheit entspricht, würden diese Kraftwerke 2012 und 2013 jeweils 100 TWh erzeugen. Folglich wird für 2011 im Folgenden von einer auf den teilweisen Atomausstieg zurückzuführenden Reduktion der Kernenergieerzeugung von 32 TWh ausgegangen und für 2012 und 2013 jeweils von 41 TWh.

³ Von Anfang April bis Ende Dezember 2011 wird Deutschland netto ca. 3 TWh Strom importieren (BDEW 2011, ENTSO-E 2011).

EEG-Mittelfristprognose zugrunde gelegt (IE 2011, Prognos/EWI/GWS 2011).⁴ Demnach wird die Bruttostromnachfrage in den Jahren 2012 und 2013 um jeweils knapp 1 % weiter sinken. Für die Exportbilanz wird an dieser Stelle vereinfachend angenommen, dass Deutschland 2012 und 2013 eine ausgeglichene Import-/Exportbilanz aufweisen wird⁵.

Abbildung 8 Veränderungen der deutschen Stromerzeugungsbilanz der Jahre 2011 bis 2013 gegenüber der Situation im Jahr 2010



Quellen: Eigene Darstellung und Berechnungen auf Grundlage von BDEW (2011), AG Energiebilanzen (2011), IE (2011) und Prognos/EWI/GWS (2011).

Die Abbildung 1 zeigt, dass bereits im Jahr 2011 die entfallene Stromerzeugung aus Kernkraft in Höhe von rund 32 TWh vollständig durch die Kombination gesteigerter regenerativer Stromerzeugung, eines reduzierten Nettostromexports sowie der inländischen Stromeinsparung kompensiert wurde und die fossilen Kraftwerke folglich in Summe rund 3 TWh weniger Strom erzeugen mussten als im Jahr 2010. Bilanziell wurden 2011 bereits rund 60% der gegenüber 2010 reduzierten Kernenergiestromerzeugung durch regenerative Energien ersetzt.

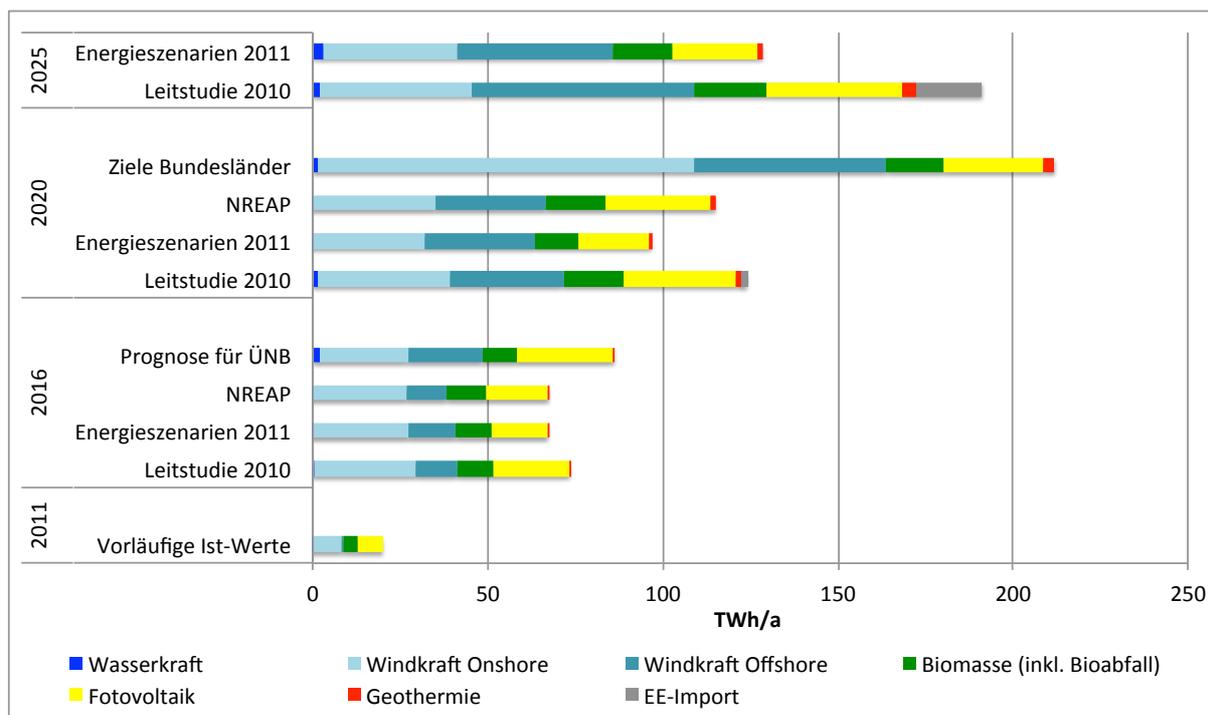
Bis 2013 wird der erwartete Zubau an erneuerbarer Stromerzeugung die Stromerzeugung der stillgelegten Kernkraftwerke jahresbilanziell voll kompensiert haben. Gemeinsam mit der (angenommenen) Einstellung der Nettoexporte sowie einer weiter leicht sinkenden inländischen Stromnachfrage könnte die inländische fossile Stromerzeugung gegenüber 2010 um 32 TWh zurückgefahren werden. Die CO₂-Emissionen würden entsprechend sinken (s. u.).

⁴ Dabei wurde zum einen angenommen, dass die Änderungsrate des in der Mittelfristprognose angegebene Letztverbrauchs auch für die Entwicklung der Bruttostromnachfrage übernommen werden kann. (Die Bruttostromnachfrage enthält gegenüber dem Letztverbrauch zusätzlich Netzverluste, den Eigenverbrauch der Kraftwerke sowie die in den Stromnetzen und Stromspeichern auftretenden Verluste.) Zum anderen wurde vereinfacht angenommen, dass die Menge des nicht-EEG-geförderten erneuerbar erzeugten Stroms gegenüber 2010 unverändert bleibt. Zwischen 2005 und 2010 lag diese (vor allem aus großen Wasserkraftwerken stammende) Strommenge stets zwischen 19 und 21 TWh/a.

⁵ Dies deckt sich mit Ergebnissen von Strommarktmodellen. Siehe z. B. Kunz et al. (2011).

Dem 13. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes zufolge erfolgt bis zum Jahr 2022 ein vollständiger Ausstieg aus der Kernenergie. Dabei werden die letzten sechs Kernkraftwerke in einem relativ kurzen Zeitfenster (zwischen Ende 2021 und Ende 2022) ihren Betrieb einstellen. Bis Ende 2022 sind damit gegenüber 2013 weitere rund 100 TWh nuklearer Stromerzeugung zu ersetzen.

Abbildung 9 Zusätzliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gegenüber 2010 nach verschiedenen Szenarien bzw. Ausbauzielen



Quellen: Eigene Darstellung nach Angaben in BDEW (2011), BMU (2010), BMWi (2011), Bundesregierung (2010a [NREAP]), Prognos (2011 [Prognose für ÜNB]) dena (2011 [Ziele Bundesländer]).

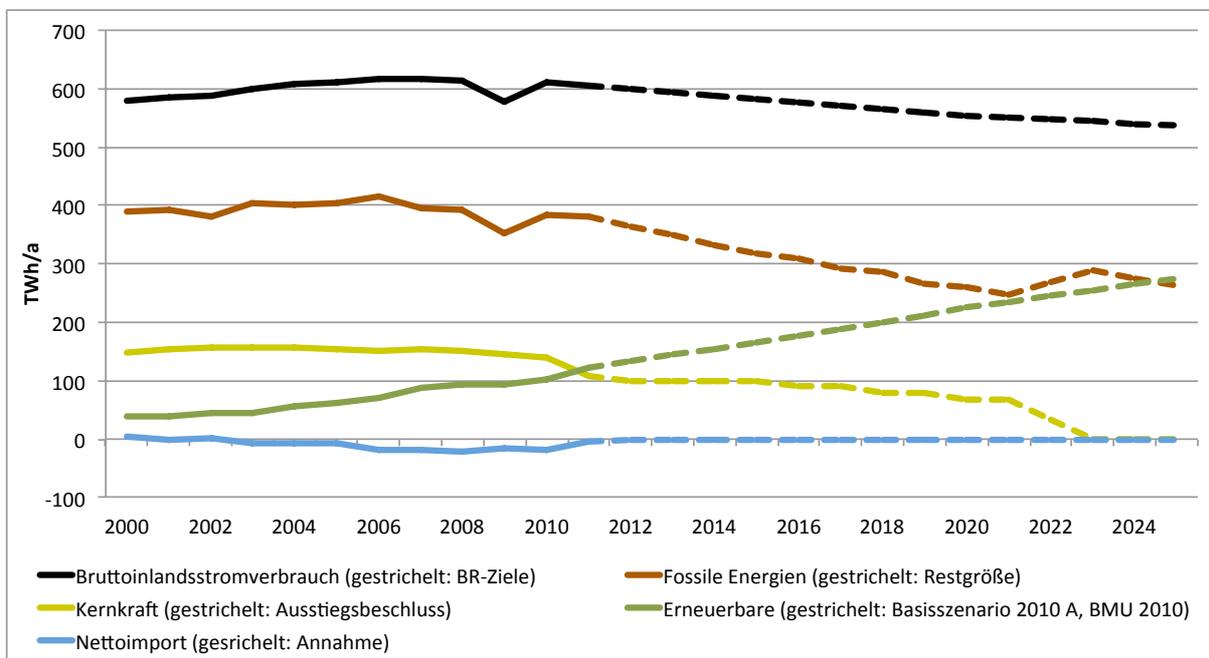
Um zu ermitteln, inwieweit dieser vollständige Ersatz durch einen weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien geleistet werden kann, stehen verschiedene Szenarien zur Verfügung bzw. können konkrete politische Zielsetzungen von Bund und Bundesländern herangezogen werden (vgl. Abbildung). Die Leitstudie 2010, die im Auftrag des BMU erstellt wurde, erwartet einen weiteren Zuwachs der inländischen erneuerbaren Stromerzeugung gegenüber 2010 um rund 125 TWh bis 2020 und um 172 TWh bis 2025. Damit ist sie nur wenig optimistischer als die im Nationalen Aktionsplan Erneuerbare Energien (NREAP) an die EU gemeldeten nationalen Ziele für 2020 (Bundesregierung 2010a). Mit rund 95 TWh (2020) bzw. rund 130 TWh (2025) erwarten die im Auftrag des BMWi (2011) erstellten Energieszenarien 2011 etwas niedrigere Zuwächse. Eine Auswertung der Ausbauziele der einzelnen Bundesländer (dena 2011) zeigt dagegen, dass diese vor allem im Bereich der Windkraftnutzung im Binnenland noch deutlich über die Szenarien der Bundesregierung bzw. der von ihr in Auftrag gegebenen Studien hinausgehen.

Für den folgenden Ausblick bis 2025 werden zwei verschiedene Szenarien der inländischen Stromerzeugung und der damit verbundenen CO₂-Emissionen erstellt. In Bezug auf die neun derzeit noch am Netz befindlichen Kernkraftwerke nehmen wir in beiden Szenarien an, dass diese in ihrer laut Gesetz verbleibenden Betriebszeit durchschnittlich genauso ausgelastet werden, wie dies zwischen 2000 und 2010 erfolgt ist. Ebenfalls wird in beiden Szenarien die

Import-/Exportbilanz ab 2012 als ausgeglichen unterstellt. Damit ermittelt sich automatisch die fossile Stromerzeugung in Deutschland als Differenz zwischen Stromnachfrage und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und – bis 2022 – aus Kernenergie.

In dem Szenario „Fossil-niedrig“ (s. Abbildung 11) wird für die zukünftige Erzeugung aus erneuerbaren Energien auf des Basisszenario 2010 A der Leitstudie 2010 (BMU 2010) zurückgegriffen. Außerdem gehen wir in diesem Szenario davon aus, dass die Bruttostromnachfrage bis 2020 um durchschnittlich 1,0 % pro Jahr und danach um rund 0,6 % pro Jahr zurückgeht und somit die im Energiekonzept formulierten Stromeinsparziele von 10 % bis 2020 und von 25 % bis 2050 (jeweils gegenüber 2008) erreicht werden. Dabei sei angemerkt, dass aus heutiger Sicht aufgrund der bisher wenig konkreten Maßnahmen zur Erreichung der Vorgaben durchaus in Frage gestellt werden kann, ob diese Ziele tatsächlich erreicht werden⁶.

Abbildung 10 Stromerzeugungsbilanz in Deutschland – Szenario „Fossil-niedrig“ (2000 bis 2025)



Quellen: Eigene Darstellung nach AG Energiebilanzen (2011) und Berechnungen auf Grundlage von BDEW (2011), BMU (2010) und Bundesregierung (2010b).

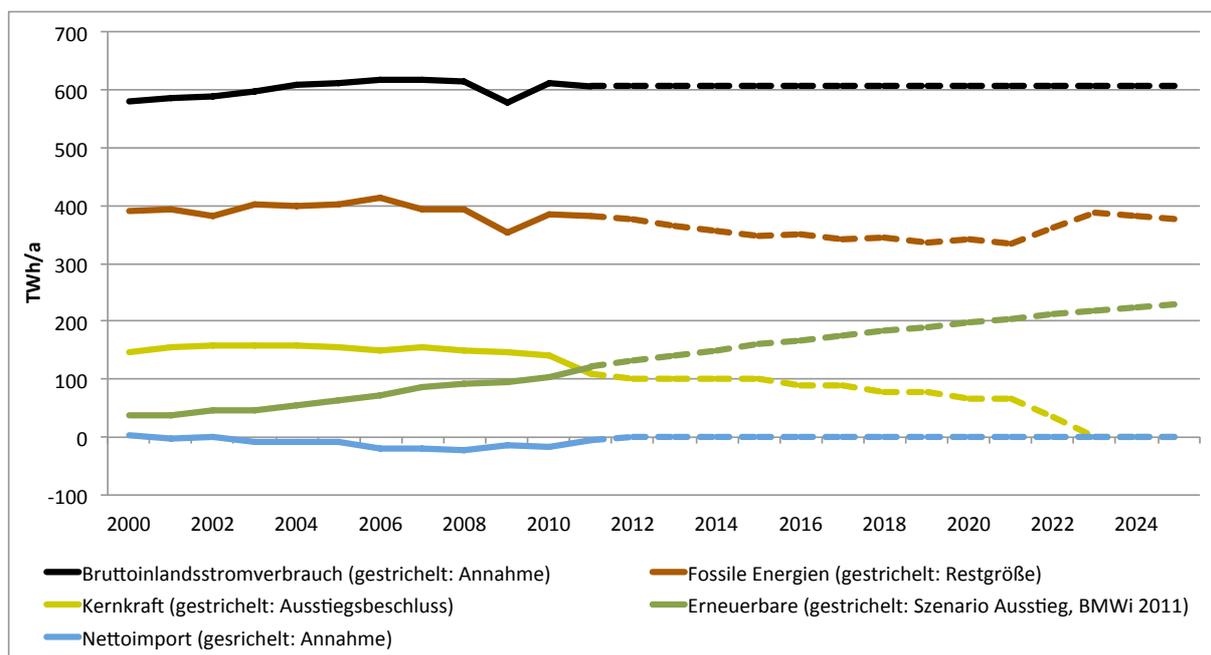
Wie die Abbildung zeigt, reicht unter diesen Annahmen die zusätzliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bis zum endgültigen Atomausstieg aus, um den gesamten Atomstrom mengenmäßig nicht nur zu ersetzen, sondern zusätzlich auch noch die fossile Stromerzeugung zu reduzieren. Wie die Abbildung außerdem zeigt, kann die erneuerbare Stromerzeugung, die in Folge der ersten Stufe des Atomausstiegs im Jahr 2011 die Erzeugung aus Kernenergie erstmals überholen wird, bis etwa 2025 auf den ersten Rang der Stromerzeugungsoptionen in Deutschland aufrücken. Das hieße auch, dass etwa ab diesem Zeitpunkt mehr als 50 % der deutschen Stromerzeugung aus regenerativen Quellen stammen wird.

⁶ In DENEFF (2011) finden sich differenzierte Vorschläge für geeignete Politikinstrumente und Maßnahmen um eine entsprechende Stromeinspardynamik zu erzeugen.

Dabei stellt die zeitliche Harmonisierung von Angebot und Nachfrage bzw. der Ausgleich der fluktuierenden Erzeugung (nicht zuletzt durch die Entwicklung geeigneter Netze und Speichermöglichkeiten) eine zentrale Herausforderung dar.

Im zweiten Szenario „Fossil-hoch“ (s. Abbildung 11) wird in Bezug auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien hingegen auf das Szenario „Ausstieg“ der Energieszenarien 2011 (BMWi 2011) zurückgegriffen. Hier findet gegenüber der Leitstudie 2010 ein deutlich langsamerer Ausbau statt. Gleichzeitig nimmt das Szenario „Fossil-hoch“ an, dass die Stromeinsparziele der Bundesregierung nicht realisiert werden können und die Bruttostromnachfrage stattdessen konstant auf dem Niveau von 2011 bleiben wird.

Abbildung 11 Stromerzeugungsbilanz in Deutschland – Szenario „Fossil-hoch“ (2000 bis 2025)

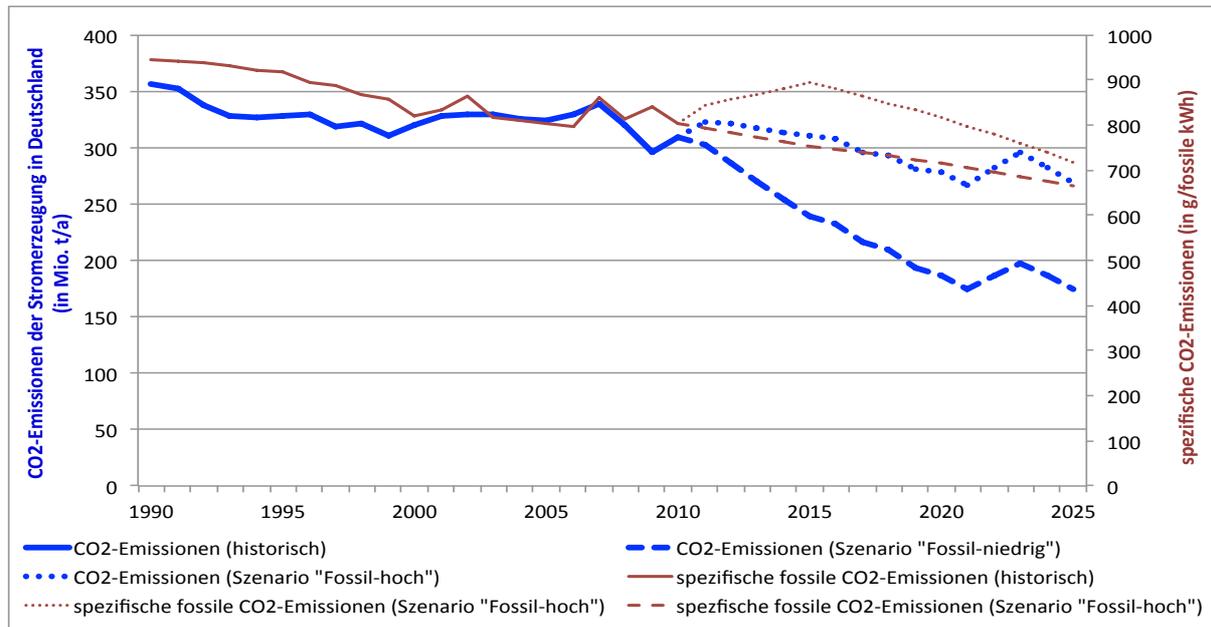


Quellen: Eigene Darstellung nach AG Energiebilanzen (2011) und Berechnungen auf Grundlage von BDEW (2011) und BMWi (2011).

Wie die Abbildung verdeutlicht, kann die fossile Stromerzeugung im Inland im Szenario „Fossil-hoch“ bis 2021 nur sehr langsam reduziert werden. In den Jahren 2022 und 2023 steigt die fossile Stromerzeugung zudem aufgrund der dann erfolgten Abschaltung des Großteils der gegenwärtig noch in Betrieb befindlichen Kernkraftwerkskapazität wieder an. Im Jahr 2025 liegt die fossile Stromerzeugung folglich etwa auf dem gleichen Niveau wie heute. Die erneuerbaren Energien haben in diesem Szenario im Jahr 2020 einen Anteil am Bruttostromverbrauch von 33 % (2025: 38 %), d. h. das Ziel der Bundesregierung (mindestens 35 % bis spätestens 2020) wird hier verfehlt.

Nachfolgende Abbildung zeigt schließlich denkbare Verläufe der CO₂-Emissionen der deutschen Stromerzeugung in den beiden Szenarien. Als zusätzliche Unsicherheit werden hier zwei unterschiedliche Verläufe der spezifischen CO₂-Emissionen der fossilen Stromerzeugung unterstellt. Analog zu der Erzeugung aus erneuerbaren Energien werden für die spezifischen Emissionen bei dem Szenario „Fossil-niedrig“ die Annahmen aus der Leitstudie 2010 (BMU 2010) übernommen, während bei dem Szenario „Fossil-hoch“ auf die entsprechenden Angaben aus dem Szenario „Ausstieg“ (BMWi 2011) zurückgegriffen wird.

Abbildung 12 Entwicklung der CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland – Szenarien „Fossil-niedrig“ und „Fossil-hoch“ (1990 bis 2025)⁷



Quellen: Eigene Darstellung nach UBA (2011) und eigenen Berechnungen auf Grundlage von BDEW (2011), BMU (2010), BMWi (2011) und Bundesregierung (2010b).

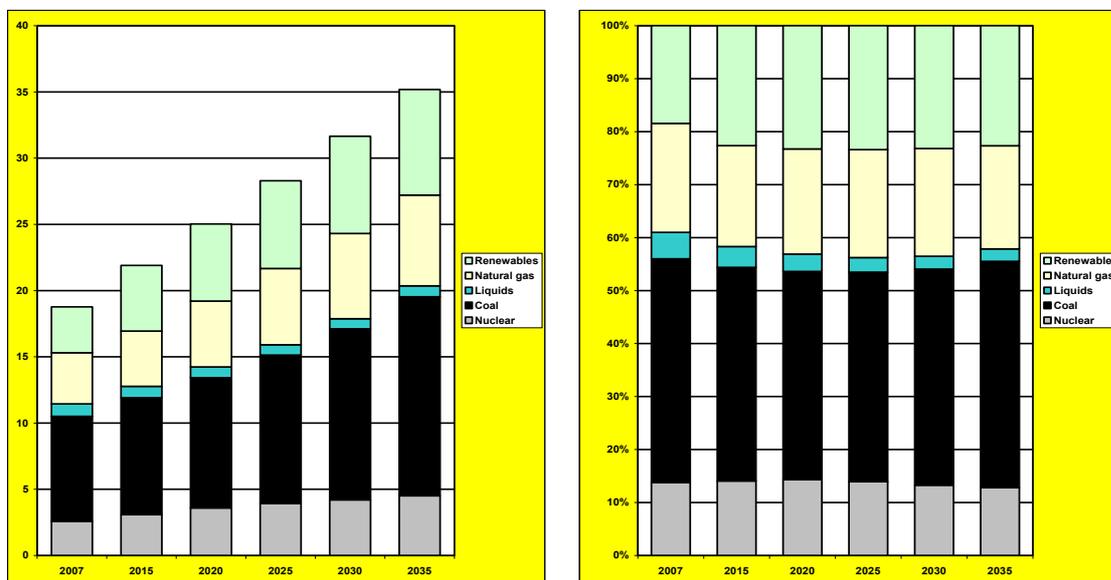
Im Szenario „Fossil-niedrig“ könnten die CO₂-Emissionen der deutschen Stromerzeugung, die seit 1990 etwa zwischen 300 und 350 Mio. Tonnen pro Jahr lagen, bis 2025 auf rund 175 Mio. t zurückgehen. Sie lägen damit um 51 % unter den entsprechenden Emissionen des Jahres 1990.⁸ Dabei ist der zweite wesentliche Ausstiegszeitraum (Ende 2021/Ende 2022) als - leichter - Ausschlag der Emissionskurve zu erkennen. Dieser kurzfristige Anstieg ändert aber nichts an dem erwarteten, grundsätzlich stark rückläufigen Trend der Emissionen der Stromerzeugung. Das Szenario „Fossil-hoch“ zeigt hingegen die Problematik auf, die sich ergibt, wenn die Stromeinsparziele verfehlt werden, der Ausbau der erneuerbaren Energien nur langsam vorankommt und zudem der fossile Strommix zunächst weiter stark von Braun- und Steinkohle dominiert wird. Die CO₂-Emissionen gehen dann nur langsam zurück und liegen im Jahr 2025 lediglich 25 % unter den Emissionen von 1990 (-21 % in 2020).

⁷ Grundlage für den Verlauf der CO₂-Emissionen zwischen 2011 und 2025 sind zum einen die abgeleitete Entwicklung der fossilen Stromerzeugung (s. Abbildung 3) und zum anderen zwei unterschiedliche Annahmen über die zukünftige Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen der fossilen Stromerzeugung. Diese spezifischen Emissionen hängen von der fossilen Energieträgerstruktur und der Effizienz der fossilen Kraftwerke ab. Die zwei in der Abbildung dargestellten und für die Berechnung der gesamten CO₂-Emissionen verwendeten Verläufe der spezifischen CO₂-Emissionen basieren zum einen (niedriger Verlauf) auf dem Basisszenario 2010 A der Leitstudie (BMU 2010) und zum anderen (hoher Verlauf) auf dem Ausstiegsszenario der Studie „Energieszenarien 2011“ (BMWi 2011).

⁸ Im Jahr 2020 lägen die CO₂-Emissionen bereits um 48 % unter den Emissionen des Jahres 1990. Dies würde bedeuten, dass der Stromsektor trotz fortgeschrittenem Atomausstieg überproportional zum Klimaziel der Bundesregierung für 2020 (Reduktion der Treibhausgasemissionen um 40 %) beitragen könnte.

Zum überregionalen Vergleich und zur längerfristigen Einordnung wird die Entwicklung der globalen Stromerzeugung nach Energieträgern nach den Daten der Referenzentwicklung des aktuellen International Energy Outlook (IEO) des US-DoE/EIA dargestellt. Danach wird weltweit ein stabiles Wachstum der Stromerzeugung – annähernd eine Verdoppelung von 2008 bis 2035 – erwartet bei einer lediglich eher geringen Variation der Erzeugungsstruktur nach Energieträgern. Für Kernenergie wird eine marginale Anteilsminderung erwartet, für Kohlen ein praktisch konstanter Anteil; die Stromerzeugungsanteile auf der Grundlage von Öl und Gas sinken im Zeitverlauf leicht, während der auf regenerative Energieträger entfallende Anteil leicht – im Wesentlichen bis 2015 – ansteigt. Aufgrund der generellen Wachstumserwartung steigen allerdings die absoluten Stromerzeugungsmengen aus allen Energieträgern (abgesehen von Mineralöl, das auch jetzt nur gering beteiligt ist) deutlich an.

Abbildung 13 Globale Stromerzeugung nach Einsatzenergien nach dem Referenzpfad von US-DoE/EIA: International Energy Outlook 2010, (a) in 1000 TWh, b) nach prozentualer Verteilung



Quelle: International Energy Outlook 2010, Report #:DOE/EIA 0484(2010), July 27, 2010, Fig. 70; tw. eigene Berechnungen, eigene Darstellung.

Tabelle 3 Globale Stromerzeugung nach Einsatzenergien nach dem Referenzpfad von US-DoE/EIA: International Energy Outlook 2010, (a) in 1000 TWh, b) nach prozentualer Verteilung

Year	Liquids	Nuclear	Renewables	Natural gas	Coal	Totals
1000 TWh						
2007	0,94	2,59	3,46	3,86	7,92	18,77
2015	0,86	3,08	4,96	4,17	8,83	21,90
2020	0,82	3,59	5,82	4,97	9,83	25,03
2025	0,78	3,94	6,62	5,76	11,19	28,29
2030	0,77	4,20	7,34	6,43	12,91	31,65
2035	0,83	4,51	7,97	6,85	15,02	35,18
Anteile, %						
2007	5,01	13,80	18,43	20,56	42,19	100
2015	3,93	14,06	22,65	19,04	40,32	100
2020	3,28	14,34	23,25	19,86	39,27	100
2025	2,76	13,93	23,40	20,36	39,55	100
2030	2,43	13,27	23,19	20,32	40,79	100
2035	2,36	12,82	22,65	19,47	42,69	100

Quelle: International Energy Outlook 2010, Report #:DOE/EIA 0484(2010), July 27, 2010, Fig. 70; tw. eigene Berechnungen.

4. Sachliche Abgrenzung

Beim Vergleich von Fahrzeugen oder Fahrzeugkonzepten, die mineralölbasierte Kraftstoffe als energetische Basis einsetzen, kann für einen in der Regel zureichenden Ansatz auf den Energiegehalt der Treibstoffe und die bei dessen Verbrennung freiwerdenden Stoffe (unter Klimaschutzgesichtspunkten insbesondere CO₂) Bezug genommen werden (Ansatz „Tank to Wheels“, TTW). Dies wird durch die geringen Unterschiede in den Vorketten bzw. der Koppelproduktion der Treibstoffe auf der selben stofflichen Grundlage ermöglicht. Bei Fahrzeugen und Fahrzeugkonzepten, deren Antriebsenergien bewertungsrelevant unterschiedliche Vorketten aufweisen, sind demgegenüber für einen sachgerechten Vergleich auch die Vorketten einzubeziehen. Anzustreben ist dabei eine möglichst vollständige Einbeziehung, die zum Energiefluss im unmittelbaren Zusammenhang mit dem Betrieb (TTW) auch die gesamte Vorkette von der Energiequelle zum Fahrzeug („Well to Tank“, WTT) ergänzt und eine Gesamtbetrachtung („Well to Wheels“, WTW) ermöglicht.

Speziell bei elektrischen Antrieben ist der Prozess der Stromerzeugung von maßgeblicher Bedeutung, da im Rahmen der dabei genutzten Energiewandlungen in aller Regel nur eine gegenüber dem Energiegehalt der Einsatzenergieträger deutlich geminderte Energiemenge als elektrische Energie verfügbar gemacht werden kann. Die Betrachtung muss daher zumindest auf der Basis des Primärenergieeinsatzes erfolgen. Die Einbeziehung der weiteren Vorketten und indirekten Beiträge erfolgt über GEMIS bzw. auf der Grundlage der auf Europa bezogenen Ansätze von EUCAR/CONCAWE, um einen möglichst konsistenten Ansatz im Vergleich von Elektrofahrzeugen mit herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen zu stützen.

5. Ansätze zu den Messgrößen

Der *absolute* und *relative* Umfang der Elektromobilität, namentlich die Verwendung der hier insbesondere interessierenden Elektro-PKW, ist bezüglich der Verkehrserledigung und des Energieverbrauchs aktuell sehr gering. Daher kann bereits auf der Grundlage überschlägiger Betrachtungen mit zureichender Sicherheit dargestellt werden, dass zurzeit noch keine sub-

stanziale Umweltentlastung zu erwarten ist. Während dies hinsichtlich der Belastungen mit Stoffen, die auch in geringsten Mengen von Relevanz sind, ggf. einer genaueren – hier aus zeitlichen Gründen nicht möglichen – Überprüfung bedarf, besteht betreffend der Energieeinsätze und der damit zusammenhängenden Klimabelastungen diesbezüglich kein Zweifel, wie aus der nachfolgenden Tabelle 4 abzuleiten ist. Die nachfolgende Betrachtung der Umweltverträglichkeit hinsichtlich dieser Parameter ist daher zunächst auf die *spezifischen* Werte zu fokussieren, also auf die Lasten je Fahrzeug, je Fahrzeug-km, je Personen-km und dergleichen.

Tabelle 4 Kenngrößen für die Elektro-PKW-Flotte im Vergleich zur gesamten PKW-Flotte 2010

Zeile	Gegenstand	Messgröße	alle PKW	Elektro-PKW	Anteil Elektro-PKW, %
1	Bestand zum 01.01.2010	Anzahl	41.737.627	1.588	0,004
2	Neuzulassungen 2010	Anzahl	2.916.260	541	0,019
3	Bestand zum 01.01.2011	Anzahl	42.301.563	2.307	0,005
4	Bestand im Jahresdurchschnitt	Anzahl	42.019.595	1.948	0,005
5	Jahresfahrleistung pro PKW	km	14.000	7.000	50,000
6	Jahresfahrleistung, PKW-Flotte	Mrd. km	588,274	0,014	0,002
7	Energieverbrauch/100 km	kWh	65	20	30,769
8	Energieverbrauch, PKW-Flotte	Mrd. kWh	382,378	0,003	0,001
9	Stromverbrauch, alle Verbraucher	Mrd. kWh	604,000	0,003	0,000

Quellen:

Z. 1 u. 3: Absolutwerte nach KBA,

www.kba.de/clin_005/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/b_emi_z_teil_2.html, letzter Zugriff 08.03.2011.

Z. 2: Absolutwerte nach KBA,

www.kba.de/clin_005/nn_191064/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/EmissionenKraftstoffe/n_emi_z_teil_2.html, letzter Zugriff 08.03.2011.

Z. 4: als arithmetisches Mittel aus Z. 1 und Z. 3.

Z. 5: alle PKW: eigene Schätzung mit Verweis auf DIW, VIZ 2009/2010, S. 302f, Werte aus 2008 um 2 % reduziert; Elektro-PKW: vorläufige Annahme.

Z. 6: aus Z. 4 und Z. 5.

Z. 7: alle PKW: eigene Schätzung mit Verweis auf DIW, VIZ 2009/2010, S. 303, Werte aus 2008 um 3 % reduziert; Elektro-PKW: vorläufige Annahme.

Z. 8: aus Z. 6 und Z. 7.

Z. 9: Brutto-Inlandsstromverbrauch nach AGEb: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2010, S. 27, www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=118, letzter Zugriff 08.03.2011.

Bei den gegebenen Größenverhältnissen ist auch klar, dass die interessante Frage nicht jene ist, ob und gegebenenfalls wie viel CO₂ die aktuelle Versuchsflotte einspart, sondern wieweit bei Generalisierung des gegenwärtigen Stands von einer CO₂-Einsparung auszugehen ist, bzw. welche Modifikationen vom heutigen Stand aus erforderlich wären, um eine mehr oder weniger signifikante CO₂-Reduktion zu erreichen.

In abgeminderter Form trifft das auch auf den Status im Jahr 2020 zu: Für diesen Zeitpunkt hat die Bundesregierung als Ziel eine Bestandszahl von 1 Mio. Elektro-PKW genannt, und zwar reine batterieelektrische Fahrzeuge (BEV, Battery Electric Vehicles) und Plug-In Hybridfahrzeuge (PHEV, Plug-In Hybrid Electric Vehicles) einschließlich Fahrzeuge mit Range-Extender (REEV, Range Extended Electric Vehicles) zusammen. Dies stellt ausgehend von

den bis dato erreichten Anteilen eine durchaus ambitionierte Zielmarke dar; zu ihrer Erreichung müsste der entsprechende Fahrzeugbestand ab jetzt – bei konstanter Wachstumsrate – jedes Jahr annähernd verdoppelt werden, was gegen Ende des Betrachtungszeitraums zu sehr beachtlichen Anteilen an den Neuzulassungen führen würde. Mittlerweile hat die Nationale Plattform Elektromobilität in ihrem Zweiten Bericht (S. 32) eine aus ihrer Sicht plausible Entwicklung der jährlichen Bestandszahlen von Elektrofahrzeuge veröffentlicht, auf die weiter unten noch eingegangen wird.

Gleichwohl würde auch eine derart erweiterte Flotte von Elektro-PKW lediglich etwas über 2 % der dann zu erwartenden gesamten PKW-Flotte ausmachen. Bei einem in Zukunft zu präzisierenden, gegenwärtig nicht unplausibel erscheinenden Ansatz einer im Vergleich zur gesamten PKW-Flotte im Durchschnitt halbierten elektrischen Fahrleistung je Elektro-PKW (also etwa 7.000 gegenüber rd. 14.000 Fz-km/a) würde die elektrisch bereitgestellte Fahrleistung einen Anteil von etwas über 1 Prozent der gesamten PKW-Fahrleistung ausmachen. Auch in diesem Fall wäre der Absolutbeitrag zur Modifikation der CO₂-Emissionen des Verkehrs weitgehend unabhängig von den zurechenbaren spezifischen CO₂-Emissionen der Elektro-PKW eher noch gering. Erst bei deutlich höheren Zahlen von Elektro-PKW zu einem späteren Zeitpunkt ist ein signifikanter Einfluss zu erwarten, der dann naturgemäß maßgeblich von den spezifischen CO₂-Emissionen der Elektro-PKW-Flotte im Vergleich zu herkömmlichen PKW abhängt (vgl. dazu auch nachfolgende Abschnitte).

Entsprechend der geringen verkehrlichen Bedeutung sind die Elektro-PKW zunächst auch stromsystemseitig von geringer Bedeutung. Netzweite Belieferungsprobleme mit Strom durch Elektro-PKW können daher praktisch ausgeschlossen werden, wenngleich bei räumlich-zeitlicher Konzentration der Ladevorgänge örtliche Anpassungen erforderlich werden können.

6. Ansätze zum Strommix

Als entscheidend für die Klimabe- bzw. -entlastung und den Vergleich mit herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen erweisen sich die CO₂-Emissionen, die aufgrund der Stromerzeugung dem Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge zuzurechnen sind. Die angemessene Zuordnung der CO₂-Emissionen ist allerdings nicht offensichtlich und unstrittig, sondern abhängig von der Betrachtungsweise. Hierbei ist zunächst zu unterscheiden zwischen:

- einer Zurechnung von CO₂-Emissionen auf Basis des konkreten Stromverbrauchs der Elektrofahrzeuge sowie der dahinter liegenden Stromerzeugung und
- einer Betrachtungsweise, die sich auf bilanzielle Zurechnungen im Rahmen eines definierten Gesamtsystems (z.B. Deutschland oder die EU) entsprechend den bestehenden regulatorischen Bilanzansätzen bezieht.

Letztere Betrachtung führt zu dem Ergebnis, dass Elektrofahrzeugen keine eigenständigen CO₂-Emissionen zuzurechnen sind: Die gesamten CO₂-Emissionen der Stromerzeugung sind im Rahmen des Cap&Trade-Regimes des Europäischen Emissionshandelssystems (European Emission Trading Scheme) limitiert und gelten mit diesem Limit als definiert⁹.

⁹ Nach Vorgaben des Europäischen Emissionshandelssystems müssen die Treibhausgasemissionen aus dem Bereich der Energiewirtschaft von 2005 bis 2020 um rd. 21% reduziert werden. Entsprechend der geltenden Direktive geht die EU für den Zeitraum nach 2020 (d.h. nach dem Ende der jetzt fixierten Verpflichtungsperiode) von einer linear fortschreitenden Reduktion des caps von 1,74 %/a aus (vgl. Directive 2009/29/EC).

Menge und Art der Stromerzeugung (und -abnahme) verändern diesen Wert nicht, d.h. eine zusätzliche Nachfrage nach Strom etwa über den Einsatz von Elektrofahrzeugen führt in diesem System zu keinen Veränderungen der CO₂-Emissionen. Wieweit zur genauen Einhaltung des im Rahmen des Emissionshandelssystems limitierten Emissionsplafonds Emissionszertifikate zugekauft oder verkauft werden, und wer die jeweiligen Partner dieser Handelsvorgänge sind, bleibt für die insgesamt dem Stromsektor zugerechnete Emissionsmenge unbedeutend. Aus der Gesamtsystembetrachtung heraus gilt diese Betrachtungsweise aber nur, wenn die politischen Vorgaben der Flottenverbrauchsgrenzen ohne Elektrofahrzeuge erreicht wird; nur kommt es durch die Elektrofahrzeuge zu einer Verminderung der tatsächlichen CO₂-Emissionen aus dem Verkehr (zur Diskussion der regulatorischen Ansätze vgl. Abschnitt 6).

Konzentriert man sich hier zunächst auf die im vorliegenden Vorhaben auftragsgemäß im Kern zu betrachtende Fragestellung, wie sich die konkreten Fahrten der Elektrofahrzeuge mit ihrem Stromverbrauch und den darauf direkt entfallenden Erzeugungsketten auf die CO₂-Emissionen auswirken, gibt es keine einfache Antwort. Vielmehr werden in der Literatur und in der öffentlichen Debatte (vgl. z.B. die Vorträge auf dem 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility, 6th of April 2011, ETH Zürich) unterschiedliche Vorstellungen über die Zuordnung vertreten, da eine physikalisch eindeutige Zuweisung einer bestimmten Stromerzeugung einerseits zu einer bestimmten Stromverwendung andererseits in der Regel schwierig ist. Da die unterschiedlichen Zuweisungskonventionen zu weit auseinander liegenden Ergebnissen führen, greift nachfolgende Analyse alle Ansätze auf und macht damit die Unterschiede transparent. Dabei wird unterschieden zwischen:

- der vollständigen Versorgung der Elektrofahrzeuge mit erneuerbarem Strom (allgemein angestrebt und in den Modellregionen teils durch hohe Anforderungen an die Zertifizierung des Ladestroms gestützt; vgl. hierzu u.a. die Strombezugsrichtlinie für Elektrofahrzeuge für die Modellregion Hamburg),
- der Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend dem derzeitigen deutschen Strommix und
- der Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend, der bei ökonomischem Betrieb anzusetzenden zusätzlichen Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge als zusätzliche Stromverbraucher.

Dabei stellen die zuvor spezifizierten drei Fälle bereits eine Auswahl der in der Literatur zu findenden Zurechnungsansätze dar, die zudem in der Praxis auch noch in unterschiedlichen Untervarianten vertreten werden. Diesbezüglich können aufgeführt werden:

- Zurechnung von (ausschließlich) regenerativ erzeugtem Strom,
- Zurechnung von Strom gemäß dem Stromerzeugungsmix in Deutschland,
- Zurechnung von Strom entsprechend den in der Spitzenlast eingesetzten Kraftwerken,
- Zurechnung von Strom entsprechend dem (geplanten/absehbaren) Zubau neuer Kraftwerkskapazitäten,
- Zurechnung von Strom gemäß einer zeitlich differenzierten Modellierung der (kostenminimierenden) Zusatzerzeugung für das neue bzw. zusätzliche Verbrauchssegment Elektrofahrzeuge,
- Zurechnung von Strom gemäß der maximal möglichen CO₂-Einsparung bei Verzicht auf die Belieferung zusätzlicher Verbraucher wie Elektrofahrzeuge.

Die unterschiedlichen Verfahren stellen letztlich Bewertungen im Rahmen bestimmter Kontexte dar, die je nach Perspektive jeweils für sich einen hohen Grad an Nachvollziehbarkeit aufweisen und für die Praxis unterschiedlich geeignet sind. Ein Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen lässt damit eine ganzheitliche Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen zu. Während hier nachfolgend zunächst auf die grundsätzliche methodische Einordnung eingegangen wird, fasst Kapitel 8 die resultierende Bewertung zusammen.

Versorgung der Elektrofahrzeuge mit regenerativem Strom

Eine Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Quellen wird allgemein angestrebt und in den Modellregionen teils durch hohe Anforderungen an die Zertifizierung des Ladestroms für die Batterien gestützt (vgl. hierzu u.a. die Strombezugsrichtlinie für Elektrofahrzeuge für die Modellregion Hamburg). Daneben wird von einzelnen Automobilunternehmen angestrebt, eigenständig Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien zu errichten, um so eine Versorgung der verkauften oder vermieteten Fahrzeuge gewährleisten zu können. Eine Betrachtungsweise, die bei der Bilanzierung der Klimawirkung von Elektrofahrzeugen die Verwendung von erneuerbarem Strom zugrunde legt, ist damit insbesondere aus der Sichtweise der Energieunternehmen und der Automobilindustrie deshalb gerechtfertigt. In diesem Fall sind die dem Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge zuzurechnenden CO₂-Werte unter Berücksichtigung auch der vor- und nachgelagerten Prozesskette zwar nicht Null, aber sehr gering, jedenfalls deutlich geringer als bei den verbrauchs- und emissionsgünstigsten herkömmlichen Vergleichsmodellen in den verschiedenen Fahrzeugsegmenten.

Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend dem deutschen Stromerzeugungsmix

Bei der zuvor diskutierten Bewertungsmethode ist der klare Herkunftsnachweis des erneuerbar erzeugten Stroms zentral, angesichts der vielfältigen, heute auf dem Markt befindlichen Angebote von Ökostrom aber nicht unumstritten. Daher erscheint es sinnvoll, als Vergleichsbasis auch eine Bewertung auf der Basis des heutigen und (aufgrund des erst in der Zukunft energiewirtschaftlich signifikanten Beitrags der Elektromobilität) vor allem aber zukünftigen Strommixes (Perspektive 2020 und 2030) vorzunehmen. Dieser Ansatz ist in der Literatur weitgehend eingeführt und hinsichtlich der spezifischen Frage nach der aus der Perspektive der Kritiker des Herkunftsnachweisansatzes entscheidenden Kriteriums der Zusätzlichkeit von Stromnachfragekontingenten und deren spezieller Deckung neutral. Unter diesem Ansatz sind gegenwärtig die Elektrofahrzeuge hinsichtlich der CO₂-Emissionen etwa in dem Bereich der besten herkömmlichen Fahrzeuge in den jeweiligen Fahrzeugsegmenten einzuordnen. Im Vergleich zu den jeweiligen Durchschnittsfahrzeugen der verschiedenen Segmente liegen die zuzurechnenden CO₂-Emissionen der Elektrofahrzeuge niedriger.

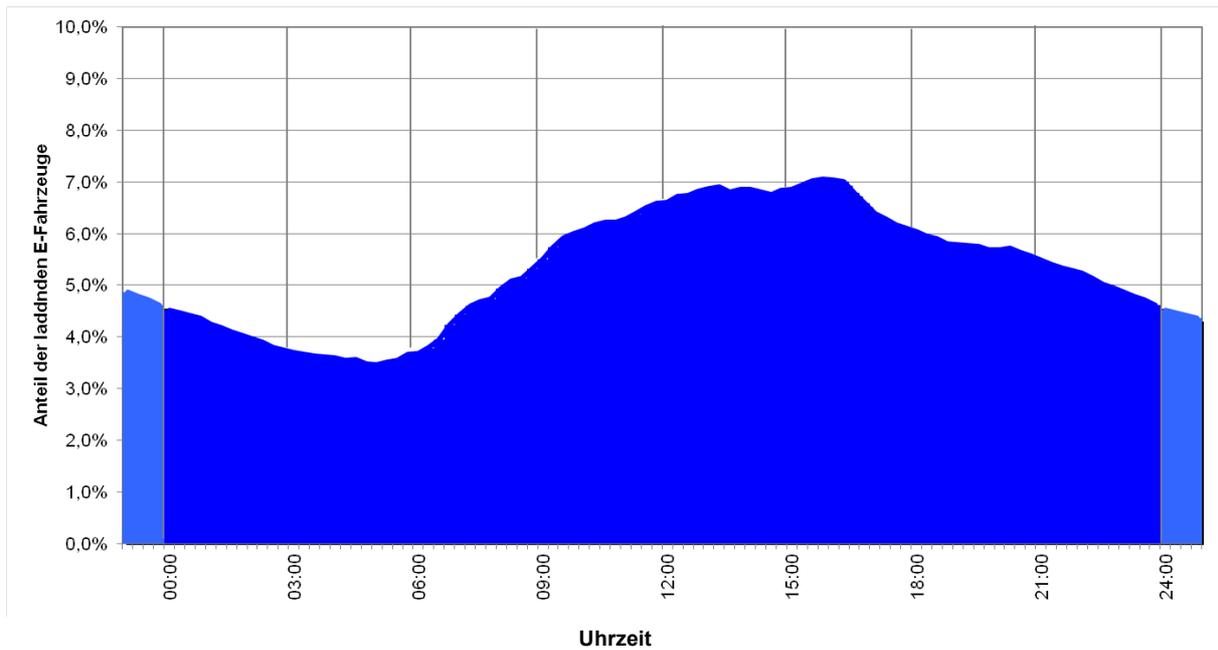
Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom bei einer Betrachtung von Elektrofahrzeuge als zusätzliche Stromverbraucher (Merit-Order Ansatz)

Die dritte in der wissenschaftlichen Literatur zu findende Bewertungsmethode geht davon aus, dass es sich bei Elektrofahrzeugen um gegenüber dem Zustand ohne Elektrofahrzeuge zusätzliche Verbraucher handelt, deren Strombedarf durch eine zusätzliche Stromerzeugung gedeckt werden muss. Dieser Sichtweise wird von Kritikern entgegen gehalten, dass die Definition von „zusätzlich“ nicht uneindeutig ist, grundsätzlich auch auf andere Stromverbraucher zutrifft und zudem eine spezifische Herausnahme eines Verbrauchssegmentes nicht

zulässig ist. Ungeachtet dieser Kritik eignet sich diese Bewertungsmethode, um eine Grenz-betrachtung anzustellen, sie stellt gleichermaßen die obere Bandbreite des Betrachtungs-raums dar. Im Rahmen dieser Bewertungsmethode wird unterstellt, dass für die Abdeckung der zusätzlichen Stromnachfrage durch den Einsatz der Elektrofahrzeuge entweder ein bis-her nicht am Netz befindliches Kraftwerk in Betrieb genommen werden muss oder aber ein bisher nicht vollständig ausgelastetes Kraftwerk einen höheren Stromerzeugungsbeitrag leis-ten kann.

Folgt man den Regeln des Kraftwerkseinsatzes nach der Merit-Order, also der (anbietersei-tig) kostengünstigsten Deckung des zusätzlichen Strombedarfs, übernimmt diese Aufgabe das sog. Grenzkraftwerk. Dabei handelt es sich unter heutigen Rahmenbedingungen in der Regel um ein fossil befeuertes Kraftwerk, wodurch sich die resultierende Klimabilanz für die Elektrofahrzeuge ohne die Durchführung zusätzlicher Maßnahmen (z.B. Last- respektive Lademanagement) nicht ganz so günstig darstellt wie bei den beiden anderen Bewertungs-methoden. Auf den zusätzlichen Kraftwerkseinsatz kann durch ein gesteuertes Laden der Elektrofahrzeuge gezielt Einfluss genommen werden. Geschieht dies in der Weise, dass hierdurch gezielt klimaverträglichere Kraftwerke adressiert werden, oder aber zukünftig sogar in nennenswertem Umfang Überschussstrom aus erneuerbarer Erzeugung, dann stellt sich die Klimabilanz der Elektrofahrzeuge deutlich vorteilhafter dar.

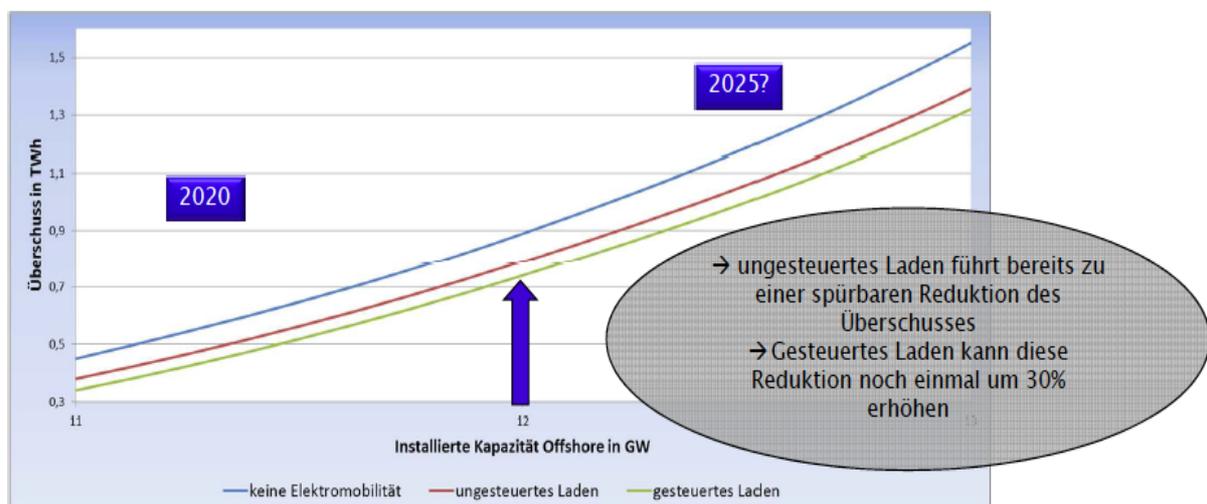
Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Analysen zeigen, dass die gemesse-nen Ladevorgänge zumindest vom Grundsatz her eine gute Übereinstimmung mit solaren Einstrahlungsganglinien zeigen (vgl. Abbildung). Dabei ist zu unterstellen, dass eine weitere Optimierung durch gezielte Anreize möglich ist. Grundsätzlich handelt es sich um ein noch lernendes System, gerade in Bezug auf das Kundenverhalten. Aufgrund der nur kurzen Be-trachtungszeit im Rahmen dieses Begleitvorhabens lassen sich hinsichtlich des Ladeverhal- tens noch keine signifikanten Trends ableiten.

Abbildung 14 Gemessene Ladevorgänge im Rahmen der Begleitforschung

N = 23.792 Ladevorgänge. Viertelstundenintervalle; Anteile der durchschnittlich ladenden Fahrzeuge im gesamten Beobachtungszeitraum. Ein Ladevorgang ist dabei definiert als Verbindung zwischen dem Fahrzeug und dem Stromnetz (unabhängig von den tatsächlichen Energieflüssen).

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Über den möglichen Einfluss eines gesteuerten Ladens von Elektrofahrzeugen liegen bisher nur geringe Erkenntnisse vor. Untersuchungen aus Bremen (BEI 2011) zeigen, dass der auftretende Überschussstrom über ein gesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen (die Ladevorgänge erfolgen dann, wenn der Wind weht) reduziert werden kann. Der weitaus größere Entlastungseffekt tritt allerdings schon bei einem auch ungesteuerten Laden (die Ladevorgänge erfolgen nachts) von Elektrofahrzeugen auf, also durch die reine Anwesenheit der Fahrzeuge als Verbraucher (vgl. Abbildung).

Abbildung 15 Quantifizierung der zusätzlich integrierten Offshore-Windstromzeugung in das Netz durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen (BEI 2011)

Bei derartigen Untersuchungen wird schnell deutlich, dass die Ergebnisse in erheblichem Maße von den getroffenen Annahmen und Systemgrenzen abhängen. In dem betrachteten Beispiel ist der Stromanteil, der insgesamt zusätzlich in das Netz integriert werden kann, in Relation zu der gesamten auftretenden Überschussproduktion der Offshore-Windenergie eher gering. Im Umkehrschluss ist ermittelt worden, dass bei einer gezielten Ausweitung der Windenergiekapazitäten lediglich 6% der Ladevorgänge der Elektrofahrzeuge hiermit abgedeckt werden können. Hinsichtlich der Frage inwieweit die Einbeziehung von Vehicle to Grid (V2G) Konzepten die Relation deutlich verbessern könnte, besteht zusätzlicher Untersuchungsbedarf.

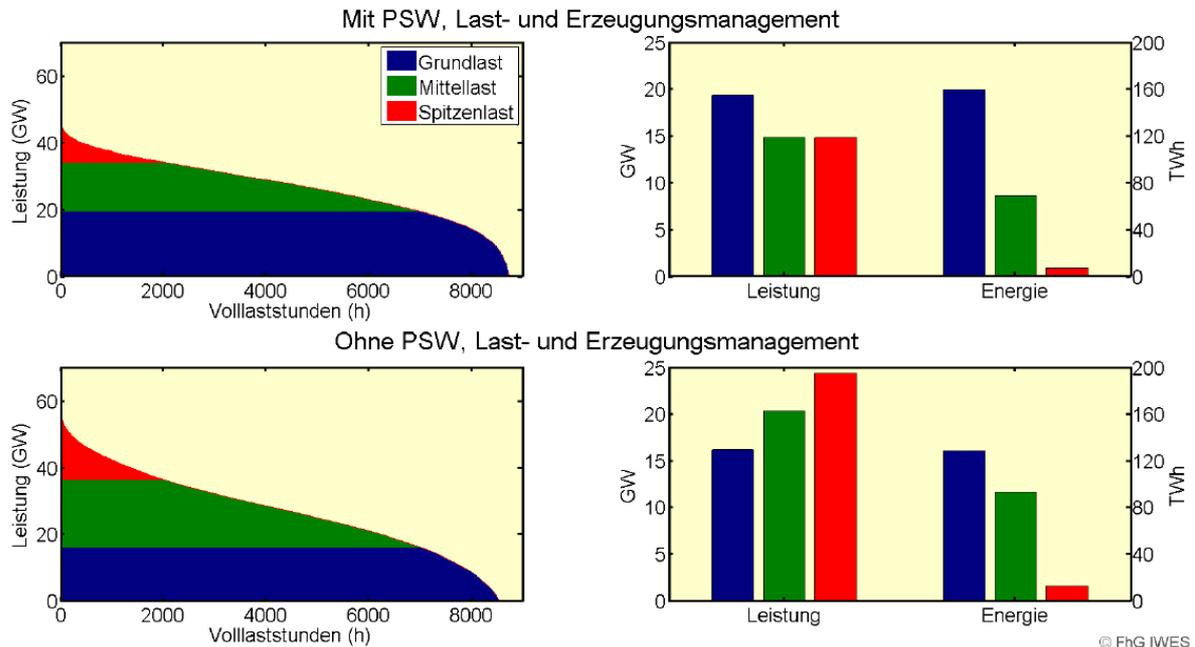
Auch die „Leitstudie 2010“ setzt sich mit der Frage der Möglichkeiten des gesteuerten Ladens auseinander, allerdings in eher genereller und nicht auf die Elektromobilität beschränkter Form. Dabei geht die Studie davon aus, dass um einen sehr weitgehenden Übergang auf eine Stromerzeugung auf regenerativer Basis zu ermöglichen, der in Deutschland mit einem deutlich erweiterten Anteil fluktuierender regenerativer Stromquellen verbunden wäre, erüchtigte Energiespeicher, ein geeigneter Netzausbau und die Möglichkeit einer stark erweiterten Ansteuerung der Stromnachfrage („demand side management“) im Rahmen einer ausgefeilten Netzsteuerung („smart grid“) zusammengeführt werden müssen. Hinsichtlich der Frage, zu welchem Zeitpunkt derartige Konzepte zu welchem Umfang realisiert sein können und werden, bestehen gegenwärtig noch erhebliche Unsicherheiten. Im Jahr 2020 werden nach der „Leitstudie 2010“ noch ganz erhebliche Leistungen (etwa 50-60 GW) und ganz erhebliche Strommengen (über 230 TWh) aus konventionellen Kondensationskraftwerken bereitgestellt werden müssen, wobei alle Einsatzbereiche (Grund-, Mittel- und Spitzenlast) nennenswert belegt sind (vgl. Tabelle und Abbildung).

Tabelle 5 Bedarf an konventionellen Kondensationskraftwerken in der Bandbreite der Ausgleichsoptionen

Basisszenario 2010 A Jahr 2020	mit Ausgleich (Pumpspeicherwerke, Erzeugungs- und Lastmanagement)			ohne Ausgleich (Pumpspeicherwerke, Erzeugungs- und Lastmanagement)		
	Grund	Mittel	Spitzen	Grund	Mittel	Spitzen
Lastbereich						
Leistung (GW; netto)	19,3	14,8	14,8	16,1	20,3	24,3
Energie (TWh; netto)	159	69	7	128	93	13
Volllaststunden (h)	8241	4671	491	7957	4578	545
Auslastung (%)	94	53	6	91	52	6

Quelle: Leitstudie 2010, S. 103.

Abbildung 16 Auswertung der Anteile von Grund- mittel- und Spitzenlast der verbleibenden Residuallast im Basisszenario 2010 A, welcher von konventionellen Kondensations-KW zu decken ist (Mittelwerte über 4 Wetterjahre 2006-2009)



Quelle: Leitstudie 2010, S. 104.

7. Ansätze im Rahmen gesamtheitlicher Bilanzierungen

Das vorliegende Vorhaben konzentriert sich auftragsgemäß auf Bestimmung und Vergleich von Verbrauchs- und Emissionsgrößen auf Einzelfahrtebene. Demgegenüber stellt sich bei systemischer Betrachtung unter Berücksichtigung der regulatorischen Gegebenheiten die Fragestellung ggf. anders dar: Insofern die Stromerzeugung dem übergreifenden Cap&Trade-Ansatz unterworfen ist (wie dies in der EU der Fall ist¹⁰), kann argumentiert werden, dass Mehr- oder Minderemissionen von CO₂ aus der Stromerzeugung durch entgegengesetzte Emissionsvariationen an anderer Stelle kompensiert werden. In der Folge kann man die dem Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge zuzurechnenden CO₂-Emissionen unabhängig von deren primärenergetischer Basis als irrelevant, nämlich insgesamt bilanzneutral ansehen: Ob die Einhaltung der CO₂-Emissionsgrenze („Cap“) durch eine emissionsärmere Stromproduktion, durch eine Verringerung der Stromproduktion oder aber durch Zukauf („Trade“) von Emissionslizenzen (und entsprechend eine Minderung der Emissionen in anderen Bereichen) gedeckt wird, hat auf die bilanzielle Beurteilung keinerlei Auswirkungen.

Die durch Substitution von Fahrleistung herkömmlich angetriebener Fahrzeuge vermiedene CO₂-Emission könnte somit in einem ersten Schritt bilanzwirksam als Nettoentlastung bewertet werden, da der Verkehr von dem übergreifenden Cap&Trade-Ansatz ausgenommen ist. Auch diese Auffassung findet Unterstützung bei verschiedenen Beteiligten am Forschungsprogramm „Modellregionen Elektromobilität“. Die Nationale Plattform Elektromobilität stellt in

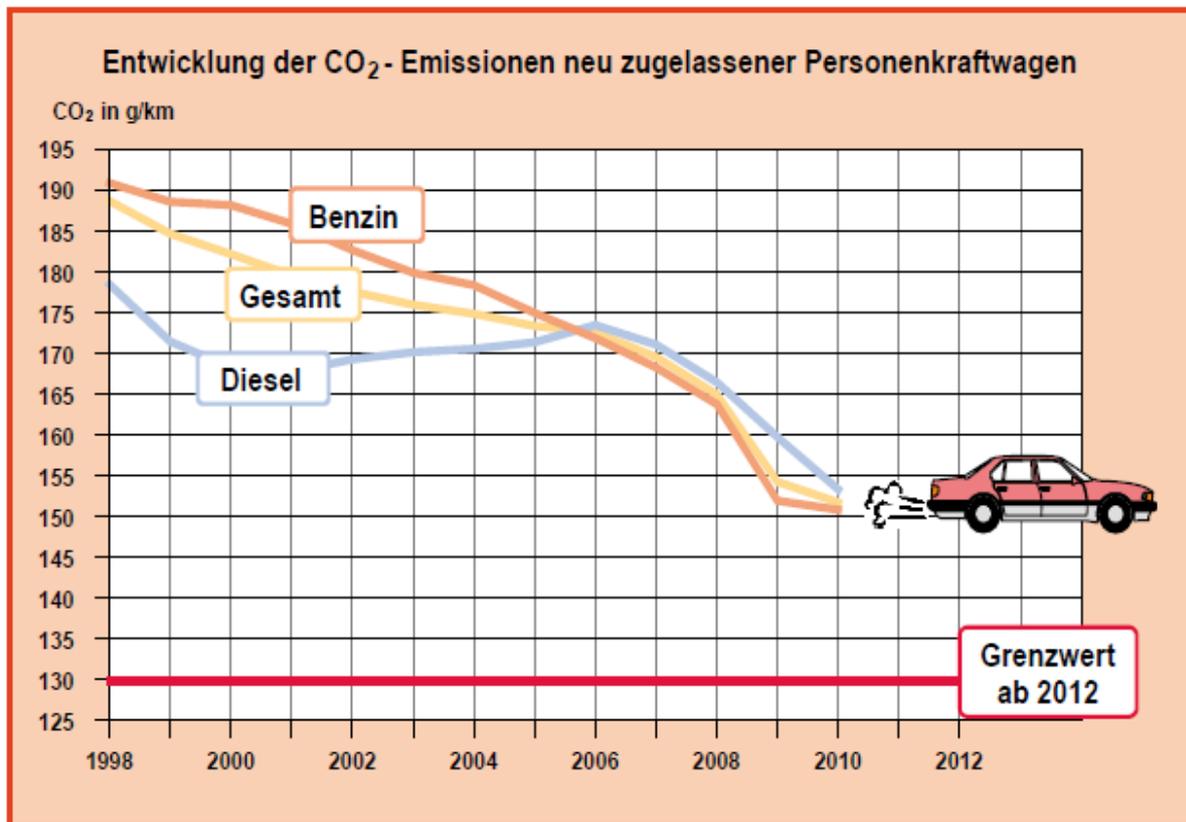
¹⁰ Nach Vorgaben des Europäischen Emissionshandelssystems müssen die Treibhausgasemissionen aus dem Bereich der Energiewirtschaft von 2005 bis 2020 um rd. 21% reduziert werden. Entsprechend der geltenden Richtlinie geht die EU für den Zeitraum nach 2020 (d.h. nach dem Ende der jetzt fixierten Verpflichtungsperiode) von einer linear fortschreitenden Reduktion des caps von 1,74 %/a aus (vgl. Directive 2009/29/EC).

ihrem zweiten Bericht fest: „Ohnehin werden wegen der Deckelung des CO₂-Ausstoßes der Energiewirtschaft über das europäische Emissionshandelssystem durch den zusätzlichen Stromansatz der Elektrofahrzeuge keine zusätzlichen CO₂-Emissionen entstehen.“ (Zweiter Bericht, S. 34)

Allerdings ist in diesem Fall bei gesamtheitlicher Betrachtung ein zweiter Effekt zu berücksichtigen, der im Verkehrsbereich greift: Dort wird (bei den quantitativ maßgeblichen PKW) bei den Normverbräuchen und -emissionen der Neufahrzeuge angesetzt und ein Maximalwert für den Durchschnitt festgelegt. In der Folge erlaubt die Zulassung eines Elektro-PKW, der mit einem Emissionswert von Null klassifiziert wird, eine entsprechende Erhöhung der Emissionen bei den übrigen Fahrzeugen. Die in der Verordnung (EG) Nr. 443/2009¹¹ für die Anfangs- und Anschubphase von Elektrofahrzeugen festgelegte – und damit lediglich vorübergehende – bilanzielle Mehrfachzählung von Elektro-PKW mit 0 g CO₂/km erhöht diesen Effekt zusätzlich. Eine detaillierte Darstellung zu dieser Verordnung ist hier als Anlage 2 beigegeben.

In der Vergangenheit hat die Automobilindustrie die von ihr selbst eingegangenen – und von der Europäischen Union akzeptierten – Verpflichtungen einer Flottenverbrauchs- bzw. CO₂-Emissionsabsenkung nicht eingehalten (Selbstverpflichtung der Europäischen Autoindustrie von 1998 zur Erreichung von 140 g CO₂/km in 2008, Beitritt der japanischen und koreanischen Autoindustrie 1999 mit Verpflichtung auf 140 g CO₂/km in 2009). Für Deutschland zeigen die aktuellen Angaben des Kraftfahrtbundesamtes (vgl. die monatliche Berichterstattung und die nachfolgende Abbildung), dass bei Fortsetzung der bisherigen Entwicklung eine Unterschreitung der neuen Grenzwerte der EU von 130 g CO₂/km im Jahr 2012 nicht bei allen Herstellern erwartet werden kann. Für die Umsetzung des EU-Zielwerts von 95 g CO₂/km für die Neufahrzeuge im Jahr 2020 ist davon auszugehen, dass nach heutigen Trends ein Teil der Hersteller diesen nur unter Einbeziehung von Elektro-Pkw wird erreichen können, wenn diese zukünftig weiter als CO₂-frei bilanziert werden. Geht man von dieser Entwicklung aus, kann die CO₂-Freistellung von Elektro-PKW zu einer zu erwartenden Erhöhung der erlaubten tatsächlich realisierten CO₂-Emission der übrigen PKW zukünftig beitragen.

¹¹ vgl. www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0001:0015:DE:PDF.

Abbildung 17 Entwicklung der CO₂-Emissionen

Quelle: Kraftfahrtbundesamt (KBA): CO₂-Emission bei 152 Gramm;
www.kba.de/clin_032/nn_191064/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/EmissionenKraftstoffe/2010__n__co2__emission__pdf,templateld=raw,property=publicationFile.pdf/2010_n_co2_emission_pdf.pdf.

Die im 2. Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (S. 32) enthaltene jahresmäßige Aufgliederung der als plausibel erachteten Bestandszahlen für Elektrofahrzeuge ermöglicht eine überschlägige Berechnung dieses Effektes. Zu beachten ist dabei, dass in Art. 4 der o.a. Europäischen Verordnung ein schrittweiser Anlauf des Flottenverbrauchslimits von 130 g CO₂/km vorgesehen ist, das zunächst nur für Teile der Neuzulassungen verbindlich ist, nämlich für 65 % in 2012, für 75 % in 2013 sowie für 80 % in 2014; ab 2015 wird dann die gesamte Neufahrzeugflotte einbezogen. Ebenfalls zu beachten ist, dass nach Art. 5 der o.a. Verordnung Fahrzeuge mit Emissionen unter 50 g CO₂/km (d.h. praktisch insbesondere Elektrofahrzeuge mit 0 g CO₂/km) vorübergehend mehrfach gezählt werden, und zwar: in 2012 und 2013 als 3,5 Fahrzeuge, in 2014 als 2,5 Fahrzeuge sowie in 2015 als 1,5 Fahrzeuge in die Durchschnittsberechnung eingehen. Ab 2016 werden die gering oder nicht CO₂-emittierenden Fahrzeuge dann nicht mehr mehrfach berücksichtigt. Für eine überschlägige Ermittlung der zu erwartenden Größen kann von einer durchschnittlichen jährlichen Neuzulassung von 3,5 Mio. PKW ausgegangen werden. Die im 2. Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität genannten Bestandszahlen werden als Bestände zum jeweiligen Jahresende interpretiert. Dies erscheint einerseits aus Plausibilitätsgründen erforderlich: Die vom KBA genannte Zahl für 2011 liegt bei 2307 Elektro-PKW, da der amtliche Bezugszeitpunkt für die Bestandszahlen der 01.01. des jeweiligen Jahres ist. Demgegenüber spricht die Nationale Plattform für 2011 von 10.000 Fahrzeugen, was auch unter Einschluss der bisher für 2011 vom KBA veröffentlichten Zulassungszahlen auch für das Jahresende noch einen eher optimistischen Wert darstellt. Andererseits stellt die Interpretation der Zahlen der Nationalen

Plattform als Jahresendwert auch hinsichtlich der ermöglichten Emissionserhöhung der übrigen PKW einen Minimalwert dar. Die Neuzulassungen der Elektrofahrzeuge werden vereinfachend als Differenzen der Bestandsentwicklung gebildet; auch dieser Ansatz, der keine Abgänge aus dem Bestand berücksichtigt, stellt eine Minimalannahme hinsichtlich der ermöglichten Emissionserhöhung der übrigen PKW dar. Andererseits wird der nach Angaben der Nationalen Plattform langsam auf 5 % der Elektrofahrzeuge in 2020 anlaufende Bestand von Nutzfahrzeugen einbezogen, also den PKW zugeschlagen; dies kann auch angesichts der bisherigen Erfahrungen mit der Größe der elektrischen Nutzfahrzeuge vertreten werden, die weitgehend dem KBA-Segment der Utilities entsprechen und als solche zu den PKW gezählt werden.

Im Ergebnis zeigt sich, dass auch die zunächst geringen Zahlen neuer Elektrofahrzeuge erkennbar zu einer Erhöhung der erlaubten CO₂-Emissionen der übrigen PKW beitragen: Ein rechnerischer Anteil von 2,27 % Null-Emissions-PKW in 2012 an den in die Emissionslimitierung einbezogenen 65 % aller Neuzulassungen erlaubt den einbezogenen Nicht-Elektro-PKW 2,32 % höhere CO₂-Emissionen – bei einem erwarteten tatsächlichen Anteil der Elektro-PKW von 0,43 %. Die Hebelwirkung durch die Mehrfachzählung verschwindet zwar ab 2016, gleichwohl wird in 2020 bei einem dann erwarteten Elektrofahrzeuge-Anteil von 5,14 % an allen PKW-Neuzulassungen das Emissionslimit der Nicht-Elektrofahrzeuge gegenüber dem Durchschnitt um 5,42 % erhöht.

Tabelle 6 Ableitung des rechnerischen Anteils der Elektrofahrzeuge an der CO₂-emissionslimitierten PKW-Neuwagenflotte

Jahr	Bestand E-Fz In 1000	Neuzul. E-Fz In 1000	Vervielfachungs- faktor	Rechn. Neuzul. E-Fz In 1000	Gesamte Neuzul. In 1000	Berücksichtigter Anteil in %	Berücksichtigte Neuzul. In 1000	Rechn. Anteil E-Fz In %
2010	2,3							
2011	10	7,7						
2012	25	15	3,5	52,5	3500	65	2275	2,27
2013	50	25	3,5	87,5	3500	75	2625	3,26
2014	100	50	2,5	125	3500	80	2800	4,35
2015	200	100	1,5	150	3500	100	3500	4,23
2016	300	100	1	100	3500	100	3500	2,86
2017	500	200	1	200	3500	100	3500	5,71
2018	650	150	1	150	3500	100	3500	4,29
2019	820	170	1	170	3500	100	3500	4,86
2020	1000	180	1	180	3500	100	3500	5,14

Ungeachtet der vorstehenden Globalbetrachtung ist zu beachten, dass einzelne Hersteller – die ja Adressat der EU-Verordnung sind – die Richtwerte auch ohne Anrechnung der Elektrofahrzeuge einhalten dürften und mit ihren Elektrofahrzeugen eine zusätzliche Emissionsreduktion erreichen. Da sich die PKW-bezogene Regelung auf die Fahrzeuge und nicht auf deren Fahrleistung bezieht, ist der Gesamteffekt allerdings nur im Rahmen größerer empirischer Erhebungen bzw. umfangreicherer Modelle abzuschätzen. Dieses wird nicht als Aufgabe des vorliegenden Projekts angesehen. In einer ersten Näherung lässt sich abschätzen, dass sich im Ergebnis die gesamten CO₂-Emissionen der PKW infolge der Einbringung von

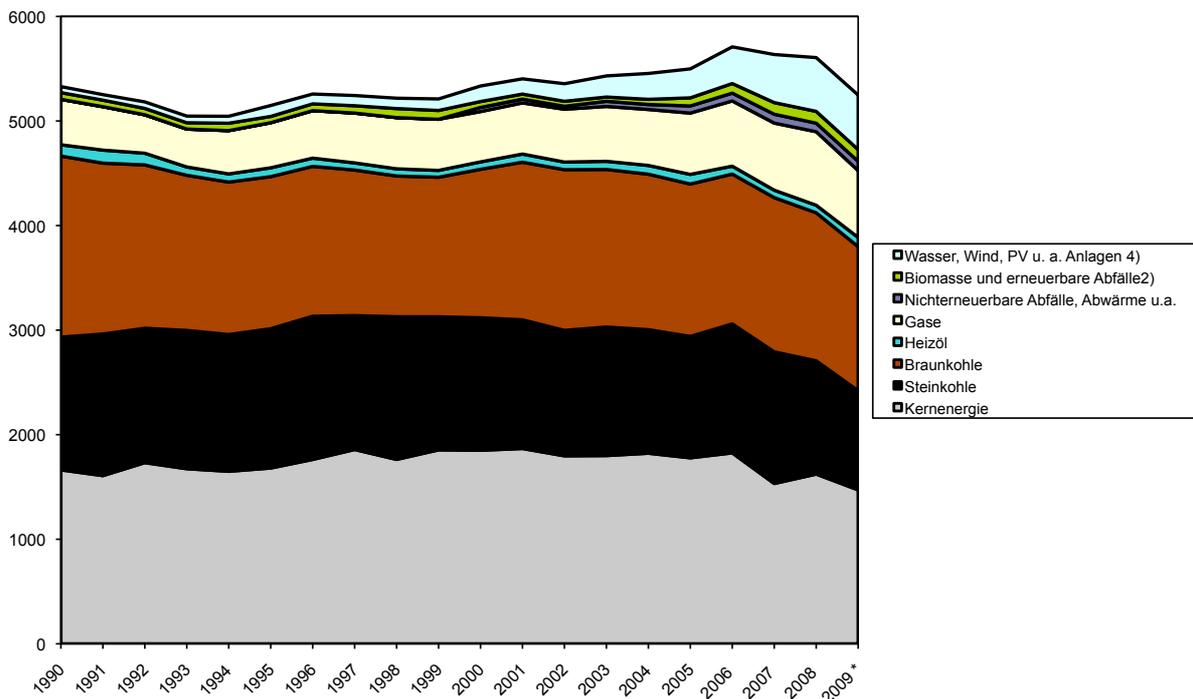
Elektro-PKW unter den gegebenen regulatorischen Bedingungen in der vollständigen Betrachtung wenig verändern werden.

8. Ansätze zu den Energieverbräuchen

Die Besonderheit und ein besonderer Vorteil des Programms „Modellregionen Elektromobilität“ besteht darin, dass der Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge aus einer praktischen, empirischen Grundlage abgeleitet werden kann: Über die Vielzahl von Fahrzeugen und Einsatzprofilen können – soweit die Daten durch entsprechende Erfassungsgeräte aufgenommen werden – die Energieverbräuche aus dem fahrzeuginternen Speicher (Batterie) aufgenommen und zu aussagekräftigen Mittelwerten und Verteilungsbildern zusammengeführt werden. Über ebenfalls messungsbasierte Schätzer können aus diesen Verbrauchswerten die Werte für die Stromabnahme aus dem Niederspannungsnetz abgeleitet werden.

Diesen Stromabnahmemengen sind die zugehörigen Energieeinsätze bei der Stromerzeugung zuzuordnen. Die Referenzdaten hierzu liefern Angaben der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, allerdings derzeit für das Jahr 2010 noch nicht in vollständiger Form. Eine Übersicht über die Entwicklung des gesamten Energieeinsatzes im Zeitverlauf liefert die nachfolgende Abbildung.

Abbildung 18 Einsatz von Energieträgern zur Stromerzeugung, Deutschland 1990-2009, in PJ



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990-2009, Stand Juli 2010, Tab. 5; eigene Darstellung; abgebildete Originalwerte zu „Biomasse und erneuerbaren Abfällen“ erscheinen allerdings missverständlich niedrig und zu „Wasser, Wind, PV u.a.“ missverständlich hoch, da „u.a.“ in erheblichem Umfang Biomasse beinhaltet.

Berechnungsseitig kann ein mehrstufiges Verfahren gewählt werden: In einer ersten Stufe kann über die Differenz zwischen der Bruttostromerzeugung und der nutzbaren Stromabgabe ein Wirkungsgrad abgeleitet werden. Hierzu werden Kraftwerkseigenverbrauch, Pumpstromaufwand, Netzverluste und Nichterfasstes zusammen als Verluste angesetzt, wobei in

der Folge – bei den gegebenen Verhältnissen – der Stromverbrauch im Inland plus dem Exportsaldo als nutzbare Stromabgabe gewertet werden. Die nachfolgende Tabelle stellt die entsprechenden Angaben nach den vorläufigen Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen für die Jahre 2009 und 2010 zusammen. Damit ergibt sich für den gesamten Betrieb des Kraftwerksparks und des Netzes im Mittel ein Wirkungsgrad von zuletzt 88,1 %.

Tabelle 7 Wirkungsgrad des Betriebs des Kraftwerksparks und des Stromnetzes, Mrd. kWh

	2009	2010
Bruttostromerzeugung	593,2	621,0
Kraftwerkseigenverbrauch	35,6	37,5
Pumpstromverbrauch	7,6	8,5
Netzverluste und Nichterfasstes	25,0	28,0
Nutzbare Abgabe	525,0	547,0
Nettoausfuhr	14,3	17,0
Nettostromverbrauch im Inland	510,6	530,0
Anteil nutzbare Abgabe an Bruttostromerzeugung, %	88,50	88,08

In einer zweiten Stufe ist aus den der Stromerzeugung zugeführten Energiemengen und der Bruttostromerzeugung der Wirkungsgrad der Energieumwandlung abzuleiten, für die Stromerzeugung insgesamt sowie für die Teilkollektive der regenerativen Stromerzeugung und falls relevant der Stromerzeugung auf fossiler Brennstoffbasis (z.B. Kohlebasis).

Beim regenerativen Strom schlägt dabei der seit einigen Jahren in den Energiebilanzen eingeführte „Wirkungsgradansatz“ zu Buche, wie im Einzelnen von der AG Energiebilanzen im „Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland“ vom August 2010, insbes. S. 9 dargestellt. Dieser Wirkungsgradansatz setzt (abweichend vom früher gebräuchlichen Substitutionsansatz) für Strom aus Windenergie, Photovoltaik und Wasserkraft mit einer gewissen Abweichung von den physikalischen Gegebenheiten einen Wirkungsgrad von 100 Prozent an, weshalb primärenergetisch der regenerative Strom bilanziell zu etwa zwei Dritteln auf Biomasse basiert, wogegen rund zwei Drittel des regenerativen Stroms nicht Biomasse basiert sind. Im Einzelnen vgl. hierzu die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 8 Wirkungsgrad der regenerativen Stromerzeugung

	Output 2009 Mrd. kWh	Output 2010 Mrd. kWh	Input 2009 PJ	Input 2010 PJ	Output 2009 PJ	Output 2010 PJ	Wirkungs- grad 2009 %	Wirkungs- grad 2010 %
Wasserkraft	19,1	19,7	69	71	69	71	100	100
Windkraft	38,6	36,5	139	131	139	131	100	100
Biomasse	25,2	28,5	381	419	91	103	24	24
Photovoltaik	6,6	12,0	24	43	24	43	99	100
Geothermie	0,0	0,0	0	0	0	0	-	-
Hausmüll	4,4	4,8	48	53	16	17	33	33
Erneuerbare insgesamt	94,9	102, 3	660	718	342	368	52	51
Kontrolle	93,9	101, 5	661	717	338	365	51	51

Quelle: Output, Mrd. kWh: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB9: Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2010 nach Energieträgern, Download unter: www.ag-energiebilanzen.de; Input: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2010, S. 39; www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=118, letzter Zugriff 28.04.2011; Output, PJ und Wirkungsgrad davon abgeleitet; Kontrolle: Summe der Einzelposten.

Über die Wirkungsgrade der Stromerzeugung insgesamt, sowie aufgrund der hohen Bedeutung für die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung auf der Basis des Einsatzes von Kohlen orientiert die nachfolgende Tabelle (die Daten über 2010 liegen noch nicht vollständig vor). Es zeigt sich, dass die Wirkungsgrade bei Kohlekraftwerken auf einem ähnlichen Niveau liegen wie bei der Stromerzeugung insgesamt.

Tabelle 9 Wirkungsgrad der Stromerzeugung aus Kohle und insgesamt

	Output 2009 Mrd. kWh	Output 2010 Mrd. kWh	Input 2009 PJ	Input 2010 PJ	Output 2009 PJ	Output 2010 PJ	Wirkungs- grad 2009 %	Wirkungs- grad 2010 %
Braunkohle	145, 6	147	136 9	.	524	.	38	.
Steinkohle	107, 9	116	923 229	.	388	.	42	.
zusammen	253, 5	263	2	.	913	.	40	.
Bruttostromerzeu- gung insgesamt	593, 2	621	520 5	.	213 6	.	41	.

Quelle: Output, Mrd. kWh: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB9: Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2010 nach Energieträgern, Download unter: www.ag-energiebilanzen.de; Input: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990-2009, Stand Juli 2010, Download: www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=139, letzter Zugriff 28.04.2011; Summe von Stein- und Braunkohle, Output in PJ und Wirkungsgrad davon abgeleitet.

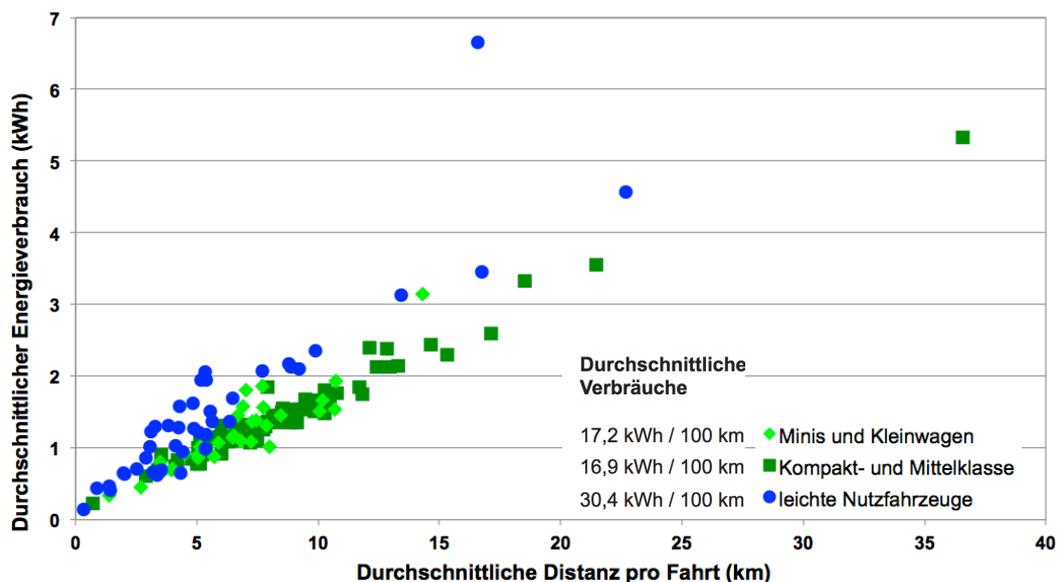
Insgesamt ergeben sich aus den Umwandlungs- und Bereitstellungswirkungsgraden zusammengefasste Wirkungsgrade von etwa 36 % für die Stromerzeugung insgesamt, von rd.

35 % für Kohlestrom, sowie – dank des sog. Wirkungsgradansatzes – von annähernd 45 % für regenerativen Strom.

Schließlich sind diese angebotsseitigen Größen mit den aus den Messdaten abgeleiteten nachfrageseitigen Energiegrößen der Elektrofahrzeuge zu verknüpfen. Nachfolgende Abbildung zeigt auf der Basis ausgewählter Messergebnisse den sich auf der zuvor dargestellten Basis ermittelnden Energiebedarf der Elektro-PKW ab Stromauslass aus dem Netz. Jeder Punkt in der Grafik bezieht sich auf eines der betrachteten 152 Fahrzeuge. Die in der Abbildung zusätzlich angegebenen durchschnittlichen Verbräuche beziehen sich auf den Durchschnitt über die Summen an verbrauchter Energie und zurückgelegten km (nicht auf Einzelfahrten) in den drei betrachteten Fahrzeugkategorien.

Dieser messungsbasierte Verbrauchswert ist um die Ladeverluste der Batterie zu erhöhen; für diese liegen derzeit noch keine belastbaren Größen vor, sind jedoch im weiteren Verlauf der Untersuchung zu erwarten. Vorläufig und bis zur Einsetzung der empirisch gestützten Größen kann hier als Orientierungsgröße ein Aufschlag in Höhe von 20 % angesetzt werden. Außerdem ist ein Aufschlag für den Winterbetrieb zu bilden, der den zusätzlichen Energiebedarf während der kalten Jahreszeit abbildet, wie er insbesondere zur Beheizung des Fahrstraumes und zur Sicherung der Beschlagfreiheit der Scheiben erforderlich ist. Aufgrund des verzögerten Zugangs der Fahrzeuge zu den einzelnen Forschungsprojekten können die Werte hierfür nicht aus den empirisch aufgenommenen Daten abgeleitet werden, sondern müssen abgeschätzt werden. In einer vorläufigen Betrachtung wird hier von einer batteriegepeisten Beheizung ausgegangen, und die fallweise vorkommende Beheizung durch eine benzinbetriebene Zusatzheizung wird vernachlässigt. Vor einer abschließenden Prüfung unter Beziehung insbesondere der in der Automobilpresse dargestellten Erfahrungswerte wird hier für die vorliegende Übersichtsrechnung ein Aufschlag von 10 – 20 % zur Beschreibung des Ganzjahresbetriebs angesetzt.

Abbildung 19 Spezifische gemessene durchschnittliche Stromverbräuche der Demonstrationsfahrzeuge

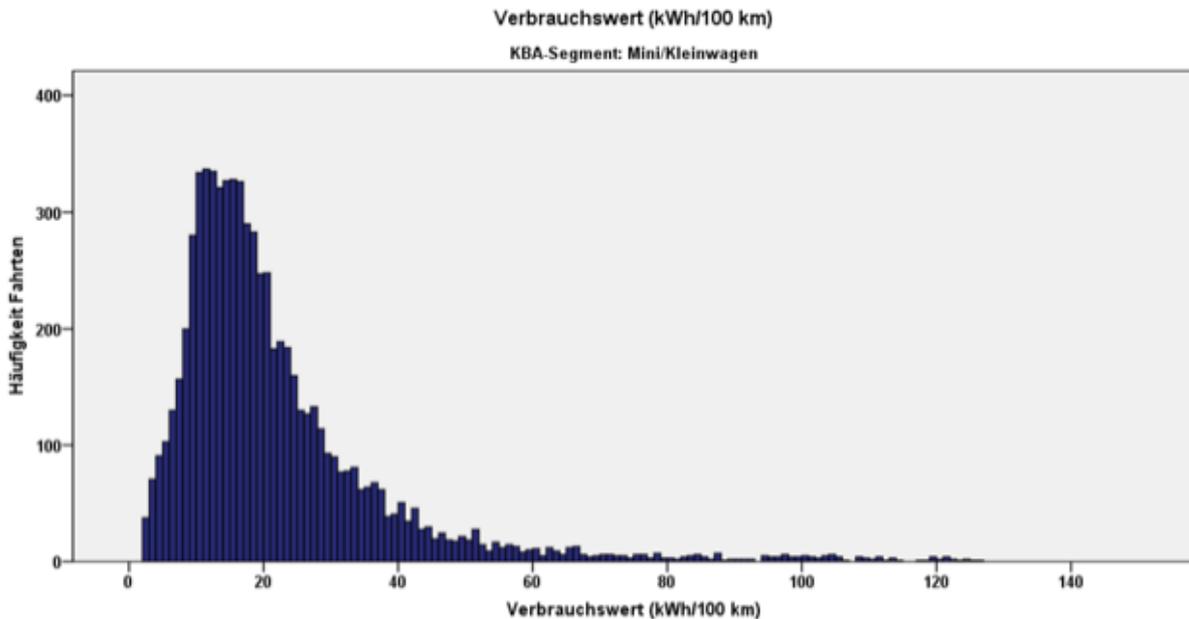


N = 7.128 / 25.765 / 6.666 Fahrten von 31 / 81 / 40 Fahrzeugen (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities).

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Insbesondere in der Fahrzeugklasse der Minis und Kleinwagen ist dabei eine deutliche Streuung um den Mittelwert zu beobachten (vgl. Abbildung). Dies liegt einerseits an der Vielfältigkeit der Fahrzeughersteller, zudem aber auch daran, dass es sich in der Regel bei den Fahrzeugen noch um Vorserien- oder Umbaufahrzeuge handelt.

Abbildung 20 Spezifische Energie-/Stromverbräuche der Demonstrationsfahrzeuge in der Klasse Minis und Kleinwagen



Verknüpft man die hier für den Strombedarf ermittelten Daten mit den zuvor berechneten Umwandlungs- und Bereitstellungswirkungsgraden von etwa 36 % für die Stromerzeugung insgesamt (Strommix) bzw. von annähernd 45 % für regenerativ erzeugten Strom, so ergeben sich je nach Zurechnungsmethoden die korrespondierenden Energieeinsätze.

Die Betrachtungen basieren dabei auf einer Status Quo Analyse. Für den Zeitrahmen einer signifikanten Markteinführung von Elektrofahrzeugen ist von deutlich höheren Stromerzeugungsanteilen erneuerbarer Energien einerseits und höheren Wirkungsgraden der fossilen Stromerzeugung andererseits auszugehen. Beide Effekte führen zu einem im Mittel zukünftig höheren Wirkungsgrad der Stromerzeugung respektive einem geringeren spezifischen Energieeinsatz für die Strombereitstellung.

9. Ansätze zu den CO₂-Emissionen

Bei der Bestimmung der resultierenden CO₂-Emissionen sollen hier die in Kapitel 5 diskutierten unterschiedlichen Bewertungs- und Zurechnungsverfahren für den physischen Strombezug der Elektrofahrzeuge berücksichtigt werden, d.h.:

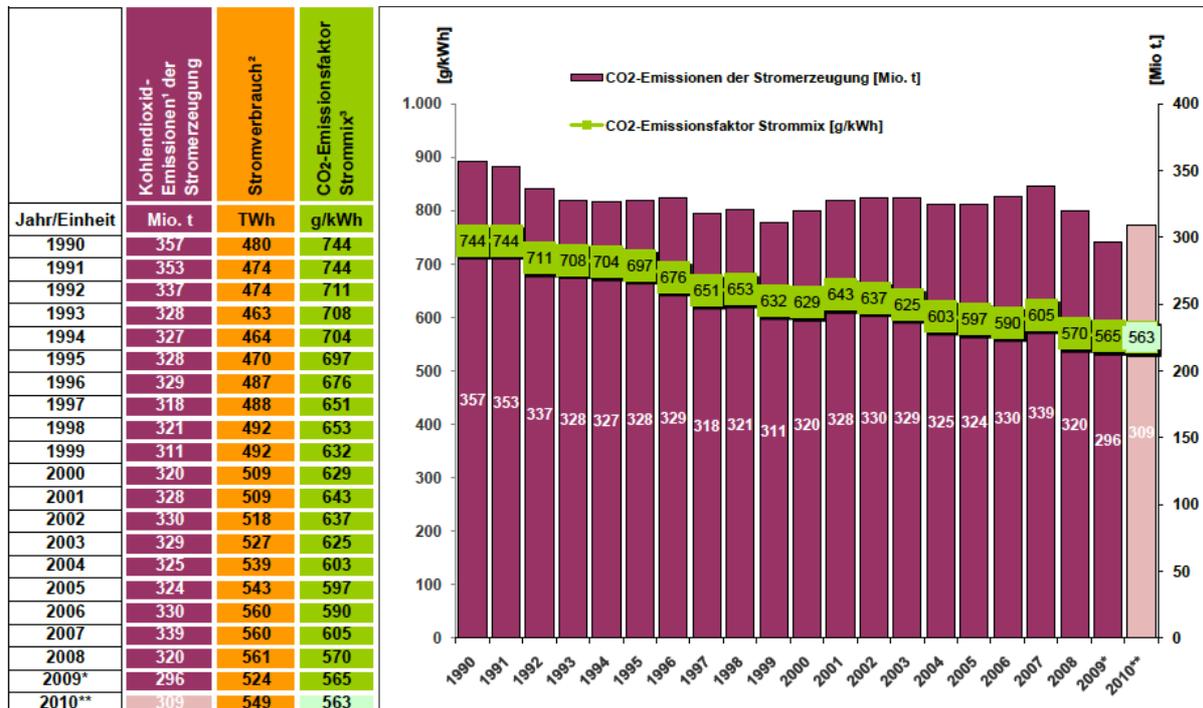
- vollständige Versorgung der Elektrofahrzeuge mit erneuerbarem Strom,
- Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend dem derzeitigen deutschen Strommix und
- Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend der bei ökonomischem Betrieb anzusetzenden zusätzlichen Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge als zusätzliche Stromverbraucher (Merit-Order Ansatz).

Zudem soll unterschieden werden zwischen einer Status Quo Betrachtung (2010) und einer perspektivischen Analyse für die Jahre 2020 und 2030; Zeiträume in denen deutlich höhere Anteile an Elektrofahrzeugen im Markt erwartet werden können und jenseits der Einzelfahrzeugebene überhaupt erst nennenswerte Entlastungseffekte zu beobachten sein werden.

Status Quo Analyse

Nachfolgende Abbildung stellt die Zeitreihe der absoluten und spezifischen CO₂-Emissionen für den deutschen Strommix bis 2010 dar. Für 2010 sind aus den vorliegenden (vorläufigen) AGEBAngaben keine substantiellen Änderungen, sondern lediglich eine geringfügige Absenkung zu beobachten. Sowohl die vergleichsweise CO₂-intensive Stromproduktion aus Steinkohle als auch die vergleichsweise emissionschwache regenerative Stromproduktion haben ihren Anteil an der Bruttostromerzeugung in 2010 gegenüber 2009 um 0,5 % erhöht (Steinkohle: von 18,2 auf 18,7 %, Erneuerbare: von 16,0 auf 16,5 %), während Braunkohle in stärkerem Umfang und Kernenergie in schwächerem Umfang Anteilsminderungen hinnehmen mussten (Braunkohle: von 24,5 auf 23,7 %, Kernenergie: von 22,7 auf 22,6 %).

Abbildung 21 Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2009 und erste Schätzung 2010 im Vergleich zu CO₂-Emissionen der Stromerzeugung



* vorläufige Angaben

** erste Schätzung

Strommix inklusive fossiler, nuklearer und erneuerbarer Energieträger.

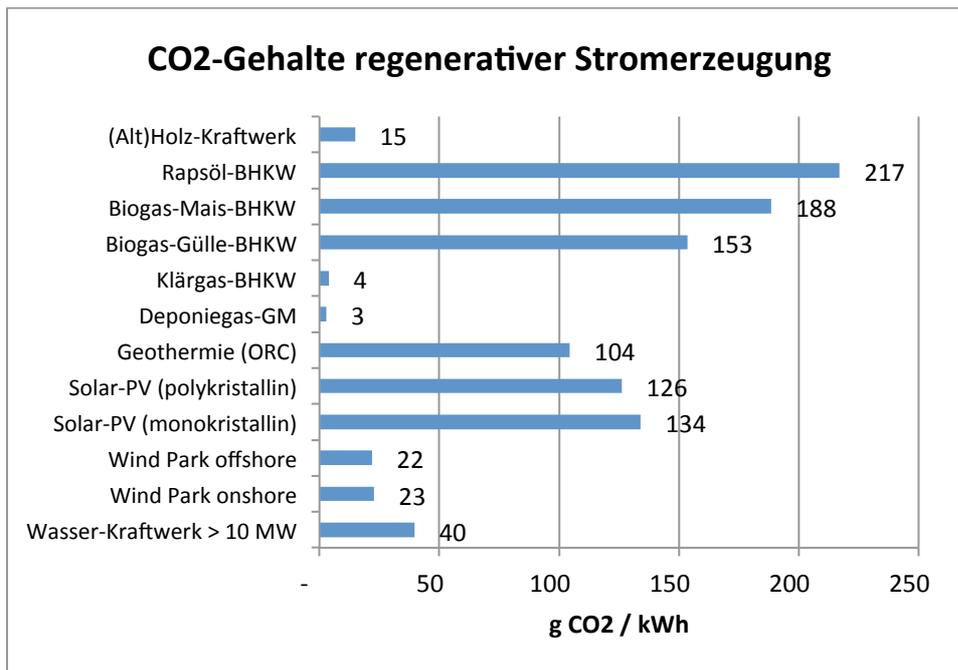
¹ UBA-Berechnung auf Grundlage von Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2010) und dem deutschen Treibhausgasinventar 1990-2009.² Stromverbrauch = Bruttostromerzeugung - Kraftwerkseigenverbrauch - Pumpstrom - Leitungsverluste.³ UBA-Berechnung auf Grundlage von Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (Veröffentlichung AGEB 2010/Energiebilanzen bis 2008) und des Statistischen Bundesamtes (Destatis 2009).

**Umwelt
Bundes
Amt**
Für Mensch und Umwelt

Quelle: Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/-strommix.pdf; letzter Zugriff 16.05.2011.

Für regenerativen Strom und für Strom aus Kohle- und Gaskraftwerken (beide Varianten sollen im Rahmen der Merit-Order Ansatzanalyse betrachtet werden) kann derzeit auf die Daten von GEMIS 4.6 (Download von Ergebnisdaten unter: www.oeko.de/service/gemis/de/material.htm) zurückgegriffen werden, die Werte für die zuzurechnenden CO₂-Gehalte je kWh bereitstellen; als Bezugsraum dieser Werte wird Deutschland 2005 angegeben. Im Gegensatz zu den Werten des UBA beinhalten die GEMIS-Werte auch die Emissionen der vorgelagerten Prozesskette also etwa der bei der Herstellung der Produktionsanlagen entstehenden Emissionen. Hierdurch erklärt sich, dass selbst die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien positive Emissionswerte aufweist.

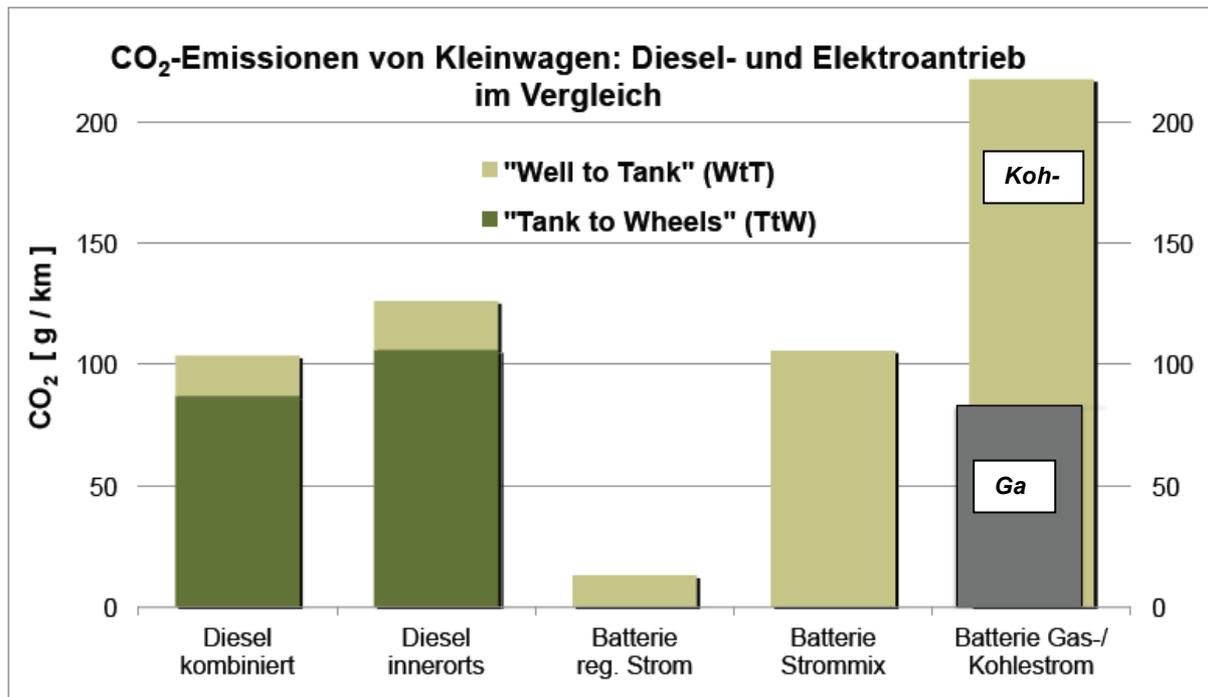
Danach streuen die Werte für regenerative Stromerzeugung in einem verhältnismäßig breiten Bereich zwischen 15 g CO₂/kWh für ein (Alt)Holzkraftwerk und 134 g CO₂/kWh für PV monokristallin, Klärgas-/ Deponiegas-Kraftwerke liegen noch deutlich darunter, Biogas-Mais- und Rapsöl-Kraftwerke noch deutlich darüber, vgl. die nachfolgende Abbildung. Für vorläufige Berechnungen wird hier ein mittlerer Wert von 70 g CO₂/kWh zugrunde gelegt. Für ein großes Import-Steinkohlekraftwerk wird ein CO₂-Wert von 1.086 g/kWh angegeben.

Abbildung 22 Übersicht CO₂-Gehalte bei regenerativer Stromerzeugung

Quelle: GEMIS 4.6, Download von Ergebnisdaten unter: www.oeko.de/service/gemis/de/material.htm; letzter Zugriff 28.05.2011; eigene Darstellung.

In Verknüpfung dieser Zahlenwerte mit den Stromverbräuchen lassen sich die zuzurechnenden spezifischen CO₂-Emissionen der Elektro-PKW bestimmen. Entsprechend der starken Dominanz von Kleinwagen und Mini-PKW bei den Elektrofahrzeugen erfolgt dies nachfolgend zunächst beispielhaft für den Vergleich der zuzurechnenden CO₂-Emissionen mit einem aktuellen emissionsarmen herkömmlich angetriebenen PKW. Hierfür wurde der VW Polo BlueMotion 87g zugrunde gelegt, der Normverbrauchswerte von 4,0 l Diesel/100 km im Stadtverkehrszyklus, von 2,9 l Diesel/100 km im Außerortszyklus, sowie 3,3 l Diesel/100 km im kombinierten Zyklus aufweist. Im Ergebnis erweist sich die erwartete deutliche Spreizung je nach dem Ansatz hinsichtlich des Strommixes. Den unteren Grenzwert stellt die „reine Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien“ dar. Als oberer Grenzwert wird zu theoretischen Vergleichszwecken die „Bewertung nach der Merit-Order Methode“ und hier im doppelten Sinne als obere Bandbreite die Betrachtung eines Kohlekraftwerks als Grenzkraftwerk herangezogen.

Abbildung 23 Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen nach unterschiedlichen Methoden am Beispiel von Kleinwagen



Berechnungsgrundlage:

Diesel: VW Polo BlueMotion 87g; direkte Emissionen (TtW): nach DAT, Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen, Ausgabe 2. Quartal 2011; Vorketten (WtT): nach CONCAWE/EUCAR, WTT-Report Version 2b, May 2006 und TTW-Report Version 3, Oct. 2008;

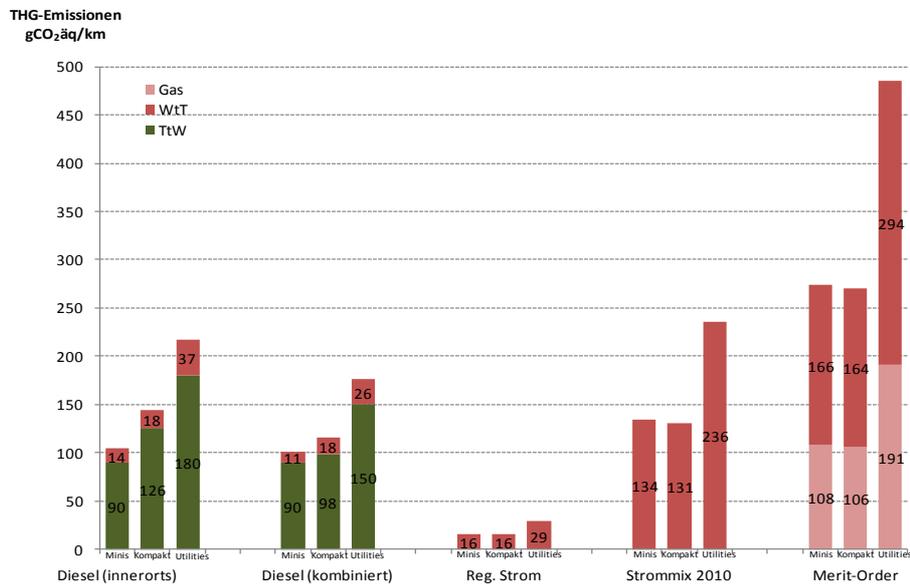
Batterie: Stromverbrauch: nach Auswertung der bisherigen Messdaten aus den „Modellregionen Elektromobilität“ einschl. geschätzter Aufschläge für Ladeverluste und Winterbetrieb (Wuppertal Institut); Vorkette (WtT): reg. Strom: mittlerer Wert nach GEMIS 4.6 für Deutschland 2005, Aug. 2010; Strommix: Strommix Deutschland 2010 nach UBA 2011; Kohlestrom: großes Import-Kohlekraftwerk, Gaskraftwerk nach GEMIS 4.6 für Deutschland 2005, Aug. 2010, mit 88 % Verteilungswirkungsgrad nach Energiebilanz 2010.

Die quantitativen Ergebnisse der Fahrzeugvergleiche in allen auswertbaren Fahrzeugsegmenten zeigt die nachfolgende Tabelle und korrespondierende Abbildung für den heutigen Status (Stand 2010).

Tabelle 10 Spezifische CO₂-Emissionen (g CO₂/km) im Vergleich von herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen bei unterschiedlichen Stromquellen

	herkömmlicher Antrieb		Elektrofahrzeug			
	innerorts	kombiniert	Regen.	Mix 2010	Merit Order Kohle	Merit Order Gas
Minis/Kleinwagen	104	101	16	134	274	108
Kompakt-/Mittelklasse	144	116	16	131	270	106
Utilities	217	176	29	236	485	191

Abbildung 24 Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für das Jahr 2010 (Darstellung nach Fahrzeugklassen und -segmenten: Minis/Kleinstwagen und Kleinwagen (kombiniert), Kompakt- und Mittelklasse (kombiniert) und Utilities (leichte Nutzfahrzeuge))



Legende: WtT = Well to Tank; TtW = Tank to Wheel; Gas = Gasanteile innerhalb Merit-Order; Minis = Minis/Kleinstwagen; Kompakt = Kompakt- und Mittelklasse; Utilities = leichte Nutzfahrzeuge.

Analysiert man die Abbildung so stellt sich deutlich heraus, dass der regenerative Pfad der sinnvolle und perspektivisch anzustrebende Pfad der Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge darstellt. Er reduziert die CO₂-Emissionen beispielsweise im Innerstädtischen Verkehr um den Faktor 6-9 (je nach Fahrzeugklasse, Vergleich der Realdaten innerhalb der Modellregionen mit Zyklusdaten konventioneller Fahrzeuge). Innerhalb des Strommix-Pfades fallen CO₂-Emissionen nahezu in der Größenordnung konventioneller Fahrzeuge an. Dies gilt auch für eine Verschiebung in Richtung gasbasierter Kapazitäten, nur im zu vermeidenden Grenzfall der zusätzlichen Induzierung einer Stromerzeugung aus Kohlekraftwerken fällt die Bilanz der Elektrofahrzeuge deutlich negativ aus. Mit zunehmender Anzahl an Elektrofahrzeugen und der vermehrten Integration erneuerbarer Energien in den Kraftwerkspark erhöhen sich damit die positiven Klimaeffekte.

Perspektivische Betrachtung

Während die Angaben für den Status Quo mit empirischen Daten belegt werden können, sind für die weitere Perspektive Annahmen zu treffen bzw. Bezüge zu heute vorliegenden Szenarien notwendig. Als maßstabbildend hierfür kann derzeit das sogenannte „Ausstiegs-szenario“ in den Energieszenarien 2011 von Prognos/EWI/GWS angesehen werden, das in Abschnitt 4 bereits beschrieben wurde.

Durch den Kernenergieausstieg und den zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien ändert sich der Strommix bis zum Jahr 2020 bereits deutlich. Allerdings tragen auch fossile Kraftwerke noch im erheblichen Umfang zur Stromerzeugung bei.

Für die Rahmenannahmen der hier betrachteten Bewertungsmethoden bedeutet dies folgendes: Erneuerbarer Strom bleibt bei dem zu erwartenden Mix (mit sehr hohen Windenergieanteilen) sehr emissionsarm. Für die spezifischen Emissionen des nationalen Strommixes resultiert dem „Ausstiegsszenario“ folgend bis 2020 ein signifikanter Rückgang gegenüber dem Jahr 2010. Der Merit-Order-Strom bewegt sich deutlich auf eine Gasstromerzeugung, je nach Einsatzweise der Elektrofahrzeuge ggf. auch bereits auf eine teilweise erneuerbare Stromerzeugung zu.

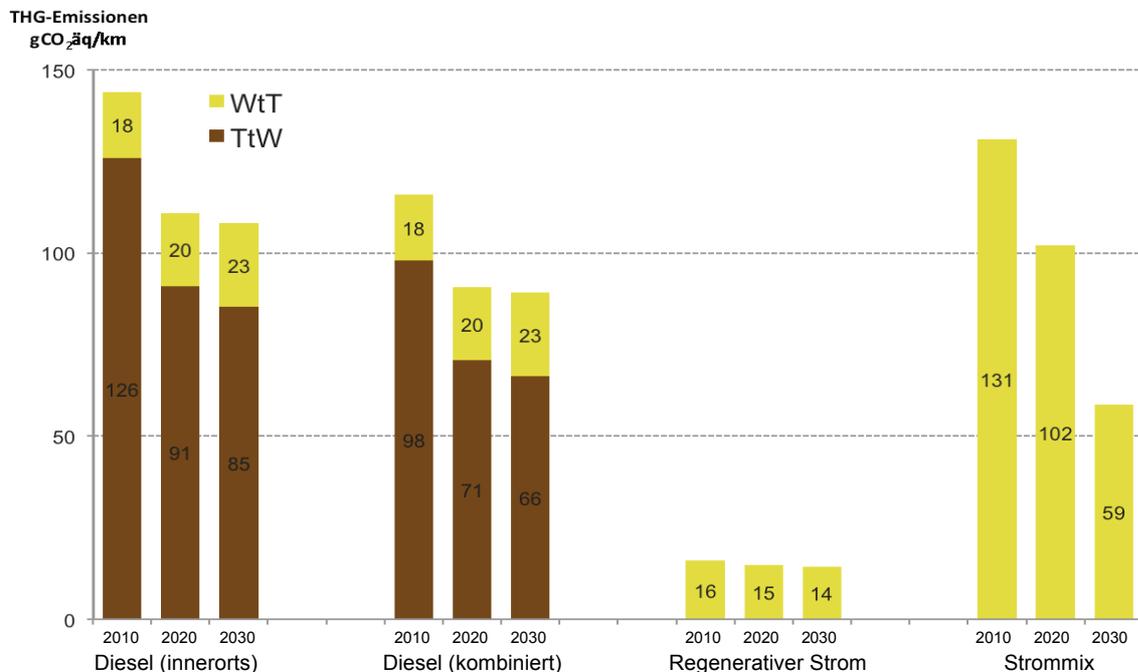
Auch bei der Grenzbetrachtung ist damit zu berücksichtigen, dass sich im weiteren Zeitverlauf die Situation im deutschen Kraftwerkspark deutlich ändert: Zwar befinden sich aktuell zu größeren Teilen Kohlekraftwerke im Bau, die in den nächsten Jahren auch sukzessive in Betrieb gehen; es kann aber schon für den weiteren Zeitraum bis 2020 und danach davon ausgegangen werden, dass aufgrund der absehbaren Anreizsysteme darüber hinaus primär Gaskraftwerke zugebaut werden. Eine derartige Vorgehensweise ist allein schon auf die Tatsache zurückzuführen, dass Gaskraftwerke aufgrund ihrer Anfahr- und Regeldynamik eine höhere Kompatibilität mit dem Ausbau erneuerbarer Energien aufweisen. In der weiteren Zukunft, etwa 2030 und danach, kann bei entsprechend gestalteter Entwicklung des Kraftwerksparks – d.h. weitgehende Konzentration auf erneuerbare Energien und Erdgaskapazitäten – nach der Merit-Order-Methode eine sehr weitgehende Versorgung der Elektrofahrzeuge durch Gasstrom unterstellt werden bzw. bei einem zukünftigen Einsatz der Elektrofahrzeuge als ausgleichendes Element für die Fluktuation der Wind- und Solarstromerzeugung auch anteilig durch erneuerbaren Strom. Dies führt hinsichtlich der CO₂-Werte der Elektrofahrzeuge mindestens in den Bereich der dann besten fossil angetriebenen PKW, möglicherweise und je nach Entwicklung bei den fossil betriebenen Fahrzeugen auch zu einem erkennbaren Vorteil der Elektro-PKW.

Auch jenseits des Strommixes sind für den Vergleich Annahmen zu treffen. Für die Energieeffizienz der Batteriefahrzeuge können Verbesserungen durch Konzeptoptimierungen erwartet werden. Die Energieumsetzungen im Elektromotor sind allerdings bereits nahe der physikalischen Grenze ausgereizt. Bei den herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen ist in der Vorkette der Treibstoffbereitstellung einerseits eine leichte Verschlechterung durch einen steigenden Zugriff auf schlechtere Lagerstätten (mit höherem Energieaufwand für die Produktion) zu erwarten, andererseits eine leichte Verbesserung durch höhere Beimischungsanteile erneuerbarer Kraftstoffe. Fahrzeugseitig ist bei Umsetzung des EU-Zielwerts von 95 g CO₂/km für die Neufahrzeuge 2020 eine erhebliche Absenkung gegenüber 2010 (Durchschnitt Deutschland: 151,7 g CO₂/km) zu erwarten, wobei davon auszugehen ist, dass ein Teil der Absenkung durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen selber realisiert wird.

Für 2030 und danach kann sich die Entwicklung gegenüber dem Status Quo und selber gegenüber 2020 deutlich modifiziert darstellen: Beim Strommix ist eine zunehmende Dominanz erneuerbarer Erzeugung zu erwarten, wodurch eine weitere schrittweise CO₂-Minderung erreicht wird. Die Grenzstromerzeugung dürfte weitgehend auf Gas-Kraftwerken und bei gezielten Ladevorgängen der Elektrofahrzeuge vermehrt dann auch auf erneuerbarem Strom beruhen. Bei den herkömmlichen Fahrzeugen kann sich nach 2030 eine zunehmend signifikante Erhöhung des CO₂-Ausstoßes der fossilen Vorkette der Treibstoffbereitstellung ergeben. Eine langfristig stärkere Einbindung erneuerbarer Kraftstoffe (z.B. synthetisches Methan oder andere Kraftstoffe aus der Wirkungskette Windstrom-Elektrolyse-Wasserstoff-Kraftstoff-Synthetisierung) könnte diesen Effekt allerdings ganz oder teilweise kompensieren.

Nachfolgende Abbildung stellt am Beispiel der Kompaktklasse die Ergebnisse der Emissionsbilanz im Zeitverlauf gegenüber, wobei sich die Betrachtung auf die Analyse der Strombezugsgröße erneuerbare Energien und Strommix beschränkt.

Abbildung 25 Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für den Zeitverlauf 2010 bis 2030 am Beispiel der Kompakt- und Mittelklasse (kombiniert)



Quelle: Eigene Darstellung. Wesentliche Berechnungsannahmen: Entwicklung Strommix nach Prognos/EWI/GWS 2011. Effizienzsteigerung konventioneller Fahrzeuge bis 2020 nach eigenen Annahmen 3 %/a (nach 2020: 0,5 %/a). Erhöhung Biokraftstoffanteil gemäß BMU Leitszenario bis 2020 auf 9,7 % und bis 2030 auf 12,4 %. Erhöhung der spezifischen Emissionen der vorgelagerten Prozesskette Öl gemäß eigener Abschätzung um 10 % bis 2020 und 15 % zwischen 2020 und 2030. Effizienzsteigerung Elektrofahrzeuge nach eigenen Annahmen bis 2020 1 %/a (nach 2020: 0,25 %/a).

Die Abbildung verdeutlicht die weiter sehr positive Klimabilanz der Elektrofahrzeuge für den Fall, dass die Fahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Soweit nach 2020 die erneuerbare Stromerzeugung über das Maß der ausgeschleiften nuklearen Stromerzeugung hinaus zunehmend weitere Anteile an der gesamten Stromerzeugung übernimmt, was aus heutiger Sicht zu erwarten und politisch klar intendiert ist, wird sich das Verhältnis auch bei der Zugrundelegung des Strommixes als Bewertungsgröße zugunsten der Elektrofahrzeuge deutlich verändern. Bei einer für 2050 teils angestrebten sehr weitgehenden Stützung der Stromerzeugung auf erneuerbare Quellen (im Energiekonzept der Bundesregierung werden Anteile von mind. 80% am Strombedarf für das Jahr 2050 genannt) nähert sich der CO₂-Wert im Stromerzeugungsmix perspektivisch demjenigen der reinen erneuerbaren Erzeugung immer weiter an.

10. Fazit

Fasst man die vorgenannten Aspekte zusammen, lässt sich folgendes feststellen: In der Literatur finden sich für die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen unterschiedliche Bewertungsmethoden, deren Ergebnisse kurzfristig stark streuen und sich erst mittel- bis längerfristig perspektivisch annähern. Werden Elektrofahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben, ist ihre Klimabilanz sehr deutlich besser als diejenige fossil betriebener PKW. Wann, inwieweit und unter welchen Voraussetzungen (Herkunftsnachweis) eine direkte Zuordnung des Fahrstroms zu einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien möglich ist, ist heute allerdings umstritten. Unter pragmatischen Gesichtspunkten bietet die Strommixmethode eine gute Orientierung für die klimabezogene Bewertung von Elektrofahrzeugen. Aufgrund der auf der Zeitachse zunehmenden Anteile erneuerbarer Energien im Strommix führt dies für die Zeiten, in denen eine signifikante Durchdringung mit Elektrofahrzeugen zu erwarten ist, zu einer gegenüber heute deutlichen Verbesserung der spezifischen CO₂-Emissionen und respektive Vorteilen gegenüber mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen. Auf der Zeitachse ist allerdings zu beachten, dass auch andere Kraftstoffe auf der Basis von regenerativ erzeugtem Strom (z.B. regenerativer Wasserstoff oder unter Berücksichtigung eines weiteren Umwandlungsschrittes auch synthetisches regeneratives Methan) in den Markt eingeführt werden können und sich hierdurch eine interne Konkurrenzsituation entwickelt.

Führt man eine Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen aus Systemsicht unter Berücksichtigung der regulatorischen Rahmenbedingungen durch (Europäisches Emissionshandelssystem), können den Elektrofahrzeugen rechnerisch CO₂-Emissionen von Null zugewiesen werden, zumindest solange die Einhaltung der ebenso von der EU vorgegebenen Flottenverbrauchsgrenzwerte ohne Elektrofahrzeuge erreicht werden.

11. Literatur

50Hertz Transmission GmbH: Hochrechnungswerte-Windenergieeinspeisung; Download: www.50hertz-transmission.net/de/Netzkennzahlen.htm; letzter Zugriff 16.05.2011.

AG Energiebilanzen (2011): Stromerzeugung nach Energieträgern von 1990 bis 2010 (in TWh) Deutschland insgesamt, <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=65>, letzter Zugriff am 19.12.2011.

Aral Forschung: Frequently Asked Questions; www.aral.de/aral/faq.do?categoryId=4000141&contentId=56034¤tPage=2, letzter Zugriff 08.03.2011.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990-2009, Stand März 211, Download: www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=139, letzter Zugriff 28.04.2011.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2010 nach Energieträgern, Download unter: www.ag-energiebilanzen.de, letzter Zugriff 16.05.2011.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2010; www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=118, letzter Zugriff 28.04.2011.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland, Stand: August 2010. Download unter: www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=5, letzter Zugriff 16.05.2011.

atw, International Journal for Nuclear Power: Kernkraftwerke in Deutschland: Betriebsergebnisse 2009 (2010), Download: www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Service/602atw-betriebsergebnisse-kkw2009.pdf, letzter Zugriff 16.05.2011

BDEW (2011): Entwicklungen in der Stromwirtschaft 2011, Vortrag von Michael Nickel auf der Sitzung der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen am 16. Dezember 2011.

BEI (2011): Der Beitrag der Elektromobilität zur Netzintegration von erneuerbaren Energien in der Region NordWest, Untersuchung des Bremer Energie Institutes, Bremen, 2011.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Der Weg zur Energie der Zukunft - sicher, bezahlbar und umweltfreundlich - Eckpunkte für ein energiepolitisches Konzept, vom 06.06.2011, Download: www.bmwi.de/BMWi/Navigation/energie,did=405004.html

BMWi (2011): Energieszenarien 2011, http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/11_08_12_Energieszenarien_2011.pdf, letzter Zugriff am 19.12.2011.

BMU (2010): Leitstudie 2010 – Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf, letzter Zugriff am 19.12.2011.

- Bundesregierung (2010a): National Renewable Energy Action Plan in accordance with Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources, http://ec.europa.eu/energy/renewables/transparency_platform/doc/national_renewable_energy_action_plan_germany_en.pdf, letzter Zugriff am 19.12.2011.
- dena (2011): Vortrag von Stephan Kohler in der Arbeitsgruppe Netzentwicklungsplan am 05.07.2011 in Berlin, http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Projekte/ESD/110705_AGNep_dena_Bericht_PlattformNetze.pdf, letzter Zugriff am 19.12.2011.
- DENEFF (2011): 10-Punkte Sofortprogramm: wirtschaftlicher und schneller Atomausstieg durch Energieeffizienz, http://www.deneff.org/cms/index.php/news-reader/items/id-10-punkte-sofortprogramm.html?file=tl_files/Infomaterial/Presse/20110407%2010%20Punkte%20Kurzfassung.pdf, Zugriff am 20.12.2011.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Bearb.: Verkehr in Zahlen, jährlich, zuletzt: Verkehr in Zahlen 2010/2011, Hamburg 2010.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Inst. für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung; Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES); Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE): Leitstudie 2010.Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Stuttgart, Kassel, Telltow, Dez. 2010; Download: www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/47034.php; letzter Zugriff 16.05.2011.
- EEX (2011): Marktdaten Strom, Marktdaten Emissionsrechte, <http://www.eex.com/de/Marktdaten>, letzter Zugriff am 19.12.2011.
- ENTSO-E (2011): Exchange Data, <https://www.entsoe.eu/resources/data-portal/exchange/>, letzter Zugriff am 19.12.2011.
- Europäische Union: Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen; Amtsblatt der Europäischen Union L 140 v. 05.06.2009, Download: www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0001:0015:DE:PDF
- GEMIS 4.6: Ergebnisdaten als Excel-Datei „g46-results_aug2010daten1“, Download unter: www.oeko.de/service/gemis/de/material.htm
- Horst, Juri; Frey, Günther; Leprich, Uwe (IZES): Auswirkungen von Elektroautos auf den Kraftwerkspark und die CO₂-Emissionen in Deutschland; WWF Deutschland, Frankfurt/Main 2009.
- IE (2011): Mittelfristprognose zur deutschlandweiten Stromerzeugung aus regenerativen Kraftwerken bis 2016, http://www.eeg-kwk.net/de/file/111115_IE-Leipzig_EEG-Mittelfristprognose_bis_2016.pdf, letzter Zugriff am 19.12.2011.

- Kraftfahrtbundesamt (KBA): Bestand an Personenkraftwagen in den Jahren 2006 bis 2011 nach Kraftstoffarten;
www.kba.de/cln_005/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/b__emi__z__teil__2.html, letzter Zugriff 08.03.2011.
- Kraftfahrtbundesamt (KBA): Neuzulassungen von Personenkraftwagen in den Jahren 2005 bis 2010 nach Kraftstoffarten;
www.kba.de/cln_005/nn_191064/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/EmissionenKraftstoffe/n__emi__z__teil__2.html, letzter Zugriff 08.03.2011.
- Kraftfahrtbundesamt (KBA): CO₂-Emission bei 152 Gramm;
www.kba.de/cln_032/nn_191064/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/EmissionenKraftstoffe/2010__n__co2__emission__pdf,templateld=raw,property=publicationFile.pdf/2010_n_co2_emission_pdf.pdf, letzter Zugriff 27.05.2011.
- Kunz, F., von Hirschhausen, C.; Möst, D.; Weigt, H. (2011): Nachfragesicherung und Lastflüsse nach dem Abschalten von Kernkraftwerken in Deutschland – Sind Engpässe zu befürchten? Electricity Markets Working Papers, WP-EM-44, http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_wirtschaftswissenschaften/bwl/ee2/lehrstuhlseiten/ordner_programmes/ordner_ge/wp_em_44_Kunz_et%20al_Kernkraftwerksausstieg.pdf, letzter Zugriff am 19.12.2011.
- Luhmann, J. (2011): 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Quellen in Deutschland, in: GAIA, Band 20, Heft 4, S. 217.
- Nationale Plattform Elektromobilität: Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität; www.umweltminister.info/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_2.pdf, letzter Zugriff 27.05.2011.
- Pehnt, Martin; Höpfner, Ulrich (IFEU); Merten, Frank (Wuppertal Institut): Elektromobilität und erneuerbare Energien; Heidelberg, Wuppertal 2007.
- Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK); Institut für Infrastruktur- und Ressourcenmanagement (IIRM) der Univ. Leipzig: Der Einstieg in den Ausstieg: Energiepolitische Szenarien für einen Atomausstieg in Deutschland, vom 10.06.2011, Download Kurzfassung: www.pik-potsdam.de/aktuelles/pressemitteilungen/der-atomausstieg-ist-bezahlbar-2013-die-energiewende-aber-braucht-einen-kraftakt
- Prognos/EWI/GWS: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, 27. August 2010; www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=356294.html, letzter Zugriff 18.03.2011.
- Prognos (2011): Letztverbrauch bis 2016 – Planungsprämissen für die Berechnung der EEG-Umlage, http://www.eeg-kwk.net/de/file/111115_Prognos_Letztverbrauch_bis_2016.pdf, letzter Zugriff am 19.12.2011.
- Samadi, S.; Fischedick, M.; Lechtenböhrer, S.; Thomas, S. (2011): Kurzstudie zu möglichen Strompreiseffekten eines beschleunigten Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie, http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/Strompreiseffekte_Endbericht.pdf, letzter Zugriff am 19.12.2011.

SRU (2010): 100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar, http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2010_05_Stellung_15_erneuerbareStromversorgung.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff am 19.12.2011.

Umweltbundesamt (UBA): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2009 und erste Schätzung 2010; www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf, letzter Zugriff 16.05.2011.

US-DoE/EIA: International Energy Outlook, Report #:DOE/EIA 0484(2010), July 27, 2010; www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/, letzter Zugriff 18.03.2011.

WI (2010): Thesen des Wuppertal Instituts zum geplanten Energiekonzept der Bundesregierung, http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/WI-Thesen_Energiekonzept.pdf, letzter Zugriff am 19.12.2011.

Anlage 1

Hamburger Strombezugsrichtlinie für die Elektrofahrzeuge

Das besondere Bemühen, die Elektrofahrzeuge in den Projekten des Förderschwerpunktes „Modellregionen Elektromobilität“ mit regenerativem Strom zu versorgen macht die Strombezugsrichtlinie für die Elektrofahrzeuge in der Modellregion Hamburg deutlich; dort werden auch für die Definition von regenerativem Strom strenge Vorgaben gemacht. Der Text der Richtlinie wird nachfolgend im Wortlaut wiedergegeben:

Autostromkriterien

1. Der für das Autostromprodukt bereitgestellte Strom wird ausschließlich zu 100% aus Erneuerbaren Energien gewonnen. Darunter werden grundsätzlich jene Energieträger und Technologien akzeptiert, die in der deutschen Gesetzgebung im Sinne des EEG als erneuerbar definiert werden. Diese sind Wasserkraft, Windkraft, solarer Strahlungsenergie, Geothermie, Biomasse, Deponiegas, Klärgas, sowie Grubengas. Letztgenanntes wird im Projekt jedoch nicht als Erneuerbarer Energieträger akzeptiert.
2. Der als Erneuerbare Energie bereitgestellte Strom kann auf eindeutig beschriebene und identifizierbare Quellen zurückgeführt werden. Der Anbieter wird diese Quellen gegenüber Kunden und anderen Interessierten in geeigneter Form offen legen [z.B. Internet]. Solange dies gewährleistet ist, können zum Nachweis der Energiequellen auch Zertifikate einbezogen werden.
3. Folgende Zertifikate werden anerkannt:
 - a. RECS
 - b. EECS GoO/RES-E
4. Physische Direkt- bzw. Swapverträge können einbezogen werden.
5. Darüberhinaus muss der gelieferte Strom einen Umweltnutzen haben. Dieser kann einerseits generiert werden durch den Bezug des Stroms oder den Bezug von Zertifikaten jüngerer Anlagen oder andererseits durch Investition des Lieferanten in neue EE-Erzeugungsanlagen:
 - a. Umweltnutzen durch Bezug aus jungen Anlagen: Es bestehen folgende Vorgaben bezüglich dem Alter der Anlagen
 - i. Mindestens ein Drittel der verkauften Strommenge wird in neugebauten, EE-Kraftwerken erzeugt, die nicht älter sind als sechs Jahre,
 - ii. mindestens ein weiteres Drittel der verkauften Strommenge wird in EE-Kraftwerken erzeugt wird, die nicht älter sind als zwölf Jahre.
 - b. Umweltnutzen durch den direkten Bau von EE-Anlagen: Der Lieferant muss den Bau von neuen regenerativen Erzeugungsanlagen initiieren und darf dafür bestehende gesetzliche Förderregelungen in Anspruch nehmen. Er muss nachweisen, dass 75 Prozent der Strommenge, den die Neukunden verbraucht haben,

durch selbst initiierte Anlagen regenerativ erzeugt und ins Stromnetz eingespeist wurde. Dafür hat der Anbieter fünf Jahre Zeit. Wenn der Anbieter hauptsächlich Ökostrom vertreibt, genügt hier ein Anteil von 50 Prozent. Ist die „Neukundenregelung“ erfüllt, muss der Anbieter dafür sorgen, dass jährlich neue regenerative Anlagen initiiert werden, die eine Strommenge in Höhe von vier Prozent des Stromverbrauchs der Bestandskunden erzeugen. Das führt dazu, dass die regenerativen Anlagen im Turnus von 25 Jahren erneuert und dem aktuellen Stand der Technik angepasst werden.

6. Für die Lieferung des Ökostromprodukts muss die Energiebilanz hinsichtlich der Arbeit nach spätestens einem Jahr ausgeglichen sein (zeitlich bilanzierte Versorgung). Der Anbieter nutzt ein zuverlässiges Verfahren zur kontinuierlichen Überwachung und Sicherung der Deckung zwischen Erzeugung / Bezug und Abgabe.
7. Das Autostromprodukt muss durch eines der folgenden Labels zertifiziert sein:
 - a. TÜV-Nord Ökostrom,
 - b. TÜV-Süd Ökostrom,
 - c. Grüner Strom Label,
 - d. OK Power.

Weitere Label können auf Anfrage Berücksichtigung finden.

Anlage 2

Berücksichtigung von Elektro-PKW im europäischen Regulierungsrahmen

Karl Otto Schallaböck, 27.09.2011

Der Verkehr mit PKW und leichten Nutzfahrzeugen ist nicht in den europäischen Regulierungsrahmen beschränkter, handelbarer Emissionsrechte eingebunden, vielmehr verfolgt die Europäische Union diesbezüglich einen eigenständigen Ansatz, um auch hier die CO₂-Emissionen zu limitieren bzw. abzusenken. Traditionell gründet dieser Ansatz auf drei Eckpfeilern, die sich wechselseitig ergänzen und auf die Besonderheiten dieses Markt- bzw. Emissionssegments eingehen, nämlich

- Verbraucheraufklärung über die Verbrauchs- und CO₂-Emissionswerte der einzelnen Fahrzeugmodelle, auch im Vergleich mit anderen Modellen;
- Berücksichtigung der CO₂-Emissionswerte in der (nationalen) Besteuerung der Fahrzeuge, sowie
- Limitierung der Verbrauchs- bzw. Emissionswerte im Durchschnitt der neu zugelassenen Fahrzeuge.

Für den letztgenannten, am direktesten wirksamen Ansatz hat die EU zunächst einen Zielwert von 120 g CO₂/km ab dem Jahr 2005 formuliert. Sodann wurde die von der Automobilindustrie eingegangene Selbstverpflichtung auf einen Zielwert von 140 g CO₂/km ab dem Jahr 2008 (im Bereich des europäischen Verbandes der Kraftfahrzeughersteller ACEA) bzw. ab dem Jahr 2009 (im Bereich der Verbände der japanischen und der koreanischen Kraftfahrzeughersteller JAMA bzw. KAMA) anerkannt. Als erkennbar wurde, dass die Fahrzeugherstellerverbände die von ihnen eingegangenen Selbstverpflichtungen nicht erfüllen würden, hat die Europäische Union im Jahr 2007 ein Verfahren zur Überprüfung ihrer Strategie und zur Formulierung weiter gehender Maßnahmen angestoßen. Dieses ist in die Formulierung der Verordnung von Europäischem Parlament und Rat Nr. 443/2009 (EG) v. 23. 04. 2009, veröffentlicht im Amtsblatt L 140 v. 05.06.2009 gemündet. Gegenstand dieser Verordnung ist nach deren Titel die „Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen“.

Diese Verordnung – in der Öffentlichkeit häufig vereinfacht mit der zentralen Zielgröße von 130 g CO₂/km assoziiert – regelt den Sachverhalt in differenzierter Weise und bezieht auch – wenngleich ohne sie ausdrücklich zu benennen – Elektro-PKW mit ein. Für ein korrektes Verständnis der Verordnung und ihrer Wirkung erscheint daher auch eine differenzierte Betrachtung erforderlich. Die einzelnen Verweise auf die Verordnung beschränken sich dabei auf die Nennung der jeweils einschlägigen Artikel bzw. Abschnitte der Verordnung.

- **Bezugnahme auf die Hersteller der Neufahrzeuge**

Bezug genommen wird nicht – wie bei der seinerzeitigen Selbstverpflichtung der Automobilindustrie – auf die Gesamtheit oder Verbände der Automobilhersteller, sondern auf die einzelnen Hersteller und die ihnen jeweils zuzuordnenden Fahrzeuge. Die Definition von „Hersteller“, „Gruppe verbundener Hersteller“ und von „Emissionsgemeinschaften“ verschiedener

Hersteller ist somit für die praktische Anwendung der Verordnung von genuiner Bedeutung (vgl. Art. 3 und Art. 7). Als besonders relevante und nicht ohne weiteres selbsterklärende Sachverhalte seien angeführt:

- Die Anforderungen an die Hersteller sind unterschiedlich in Abhängigkeit von der Anzahl der ihnen zuzurechnenden in der EU neu zugelassenen Fahrzeuge: Hersteller, die (a) für weniger als 10.000 bzw. (b) für 10.000 bis 300.000 Neuzulassungen pro Jahr verantwortlich sind, können in unterschiedlicher, definierter Form Ausnahmen von den ansonsten geltenden Vorgaben beantragen (vgl. Art. 11).
- Verschiedene Hersteller können zwar nicht frei untereinander Über- und Unterdeckungen der Sollgrößen ausgleichen (entsprechend dem in anderen Bereichen eingeführten Emissionshandelsregime); sie können sich aber in definierter Form zu Emissionsgemeinschaften zusammenschließen, die dann hinsichtlich der Einhaltung der Sollgrößen als ein Hersteller beurteilt werden (vgl. Art. 7).
- **Bezugnahme auf und Berücksichtigung der Neufahrzeuge**

Gegenstand sind nicht alle produzierten oder alle im Verkehr befindlichen Fahrzeuge eines Herstellers, sondern die in einem jeweiligen Bezugsjahr von einem Hersteller stammenden im Bereich der Europäischen Union neu zugelassenen Fahrzeuge der Kategorie M (vgl. Art. 2). Für die Ermittlung der verordnungsrelevanten durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen der neuen PKW eines Herstellers werden zunächst nicht alle ihm zuzurechnenden neuen PKW berücksichtigt, vielmehr wird der berücksichtigte Anteil schrittweise an die vollständige Berücksichtigung herangeführt, wie die nachfolgende Tabelle zeigt (vgl. Art. 4):

Jahr	2012	2013	2014	ab 2015
Anteil der berücksichtigten Fahrzeuge	65 %	75 %	80 %	100 %

- **Berücksichtigung der Fahrzeugmasse**

Die Zielvorgaben für die spezifischen CO₂-Emissionen sind von den Massen der Fahrzeuge abhängig (vgl. Art. 4 und Anhang I). Der allgemein in der Öffentlichkeit kommunizierte und wahrgenommene Zielwert von 130 g CO₂/km bezieht sich zunächst auf ein Einzelfahrzeug mit einer Fahrzeugmasse von 1.372 kg. Für Fahrzeuge mit größeren oder kleineren Massen gelten pro kg Abweichung um 0,0457 g höhere Zielwerte (bei schwereren Fahrzeugen) bzw. um 0,0457 g niedrigere Zielwerte (bei leichteren Fahrzeugen). Pro 100 kg Mehrgewicht (bzw. Mindergewicht) steigt (bzw. sinkt) also der Zielwert um gut 4,5 g CO₂/km. Der Zielwert für den einzelnen Hersteller wird als Durchschnitt der Zielwerte der ihm zuzurechnenden Einzelfahrzeuge berechnet.

Der zunächst für die Jahre 2012-2015 mit 1.372 kg festgelegte Bezugswert der Fahrzeugmasse für die Zielgröße von 130 g CO₂/km wird ab 2016 und danach alle drei Jahre angepasst an die Durchschnittsmasse neuer PKW in einem in definiertem Abstand davor liegenden Zeitraum. Für 2016-2018 umfasst der Bezugszeitraum die Jahre 2011-2013. (vgl. Art. 13 und Anhang I)

- **Berücksichtigung der Elektro-PKW**

Elektro-PKW werden nicht namentlich genannt, sind jedoch in der Sonderregelung für neue PKW mit spezifischen CO₂-Emissionen von weniger als 50 g CO₂/km inkludiert. Diese Fahrzeuge werden über einige Jahre hinweg bei der Berechnung der durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen mehrfach gezählt, wie die nachfolgende Tabelle zeigt (vgl. Art. 5):

Jahr	2012	2013	2014	2015	ab 2016
1 Fahrzeug (Fz) zählt als	3,5 Fz	3,5 Fz	2,5 Fz	1,5 Fz	1 Fz

- **Berücksichtigung von Zielwertüberschreitungen**

Die Zielwerte für die spezifischen CO₂-Emissionen werden nicht über Ge- und Verbote zwingend durchgesetzt, vielmehr lösen Verfehlungen der Zielvorgaben Abgabeverpflichtungen bei den jeweils betroffenen Herstellern aus (vgl. Art. 9). Die Umsetzung der Zielwerte erfolgt also über ökonomische Anreize und entsprechend über die Wirksamkeit dieser Anreize. Rechnerisch wird die jeweils durchschnittliche Überschreitung des jeweiligen Zielwerts durch die gesamte zuzurechnende Flotte (gerundet auf drei Nachkommastellen) ermittelt und mit der zugehörigen Anzahl der Fahrzeuge multipliziert. Die festgelegten Abgabesätze sind sachlich und zeitlich gestaffelt:

- Für den Zeitraum 2012 bis 2018 erfolgt eine Staffelung der Abgabenhöhe nach der Höhe der Überschreitung des jeweiligen Zielwerts: Bis zu 1 Gramm Überschreitung beträgt die Abgabe 5 Euro pro Gramm und Fahrzeug. Eine darüber hinausgehende Überschreitung wird bis zu einer Höhe von 2 Gramm mit einer Abgabe von 15 Euro pro Gramm und Fahrzeug belastet; eine weitere darüber hinausgehende Überschreitung wird bis zu einer Höhe von 3 Gramm mit einer Abgabe von 25 Euro pro Gramm und Fahrzeug belastet. Schließlich schlägt eine weitere Überschreitung über 3 Gramm hinaus mit einer Abgabebelastung von 95 Euro pro Gramm und Fahrzeug zu Buche.
- Für die Zeit ab 2019 wird der Abgabesatz einheitlich festgelegt mit 95 Euro pro Gramm Überschreitung des jeweiligen Zielwerts.

Die auf den ersten Blick möglicherweise kompliziert erscheinende Berechnung ist in der Praxis nicht so schwierig, da sie auf einfachen Durchschnittsberechnungen aufbaut: Aus den Einzelwerten der CO₂-Emissionen wird der Durchschnitt für alle Fahrzeuge des jeweiligen Herstellers gebildet; aus dem Durchschnittsgewicht der Fahrzeuge wird der herstellereigene Sollwert abgeleitet. Die Saldierung bestätigt die Einhaltung bzw. definiert den Umfang der Verfehlung des Sollwerts. Die Höhe der Verfehlung bestimmt die durchschnittliche Abgabehöhe pro Fahrzeug; multipliziert mit der Anzahl der Fahrzeuge ergibt sich die Abgabehöhe für den jeweiligen Hersteller.

- **Weitere Regelungen**

Weitere Regelungen betreffen u.a. die Berücksichtigung von alternativen Antrieben und von Ökoinnovationen, d.h. die Bestimmung von möglichen Abzügen, bei der Ermittlung der jeweiligen herstellereigenen Zielwerte (vgl. Art. 6 und Art. 12), sowie die Überwachung einschließlich der zugehörigen Meldungen und Veröffentlichungen (vgl. Art. 8 und Art. 10, sowie

Anhang II). Außerdem werden Überprüfungsaufgaben und die daran anschließende Berichterstattung adressiert (Art. 13).

Hinsichtlich der alternativen Antriebe wird bis einschließlich 2015 ein Abschlag von 5 Prozent vorgesehen für Fahrzeuge, die mit E85 betrieben werden können, also einem Kraftstoff, der zu 85 Prozent aus Bioethanol besteht, sofern in dem jeweiligen Zulassungsstaat mindestens an 30 Prozent der Tankstellen E85 entsprechend den europäischen Nachhaltigkeitskriterien angeboten wird. Technische Ökoinnovationen, die nachweislich die CO₂-Emissionen reduzieren, jedoch nicht im standardisierten Messverfahren abgebildet werden, werden auf der Basis geeigneter Nachweise der Hersteller oder ihrer Zulieferer bis zu einer Höhe von 7 g CO₂/km bei der Ermittlung der Zielwerte des jeweiligen Herstellers berücksichtigt. Zur öffentlichen Darstellung wird festgelegt, dass die Kommission jeweils bis zum 31. 10. eines jeden Jahres, beginnend 2011, für das vorangegangene Kalenderjahr berichtet: nach Herstellern differenziert die jeweiligen Zielwerte und die tatsächlichen durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen, sowie die Differenz daraus, außerdem für alle neu zugelassenen PKW die durchschnittliche Masse und die durchschnittlichen CO₂-Emissionen. Bei den Überprüfungsaufgaben wird u.a. auf das weitere Absenkungsziel auf 95 g CO₂/km bis zum Jahr 2020 eingegangen und bis 01.01.2013 in Aussicht gestellt, die Modalitäten für eine kostengünstige Erreichung dieses Ziels und die Aspekte seiner Umsetzung festzulegen.

- **Wirkung der Einbeziehung von Elektrofahrzeugen**

Soweit ein Hersteller ohne Berücksichtigung der Elektrofahrzeuge seinen Sollwert einhält bzw. unterschreitet, kann er aus seinen Elektrofahrzeugen keinen direkten Vorteil aus der EU-Regelung ziehen: Sie reduzieren zwar die ihm zugerechneten durchschnittlichen CO₂-Emissionen, im Gegensatz zu den Abgaben bei Überschreitung sind jedoch keine Zuwendungen bei Unterschreitung vorgesehen. Allerdings wird ein Hersteller mit zunehmender Unterschreitung seines Zielwerts auch zunehmend als Partner für eine Emissionsgemeinschaft mehrerer Hersteller interessant, da er in entsprechend zunehmendem Maß Sollwertüberschreitungen anderer Partner ausgleichen und damit die insgesamt anfallende Abgabenhöhe mindern kann.

Soweit andererseits ein Hersteller ohne Berücksichtigung der Elektrofahrzeuge seinen Sollwert überschreitet, trägt jedes Elektrofahrzeug zur Minderung der ohne Elektrofahrzeuge anfallenden Abgaben bei, ggf. bis zum völligen Entfallen einer Abgabelast. Die Höhe der Entlastung ist abhängig von der ansonsten gegebenen Höhe der Sollwertüberschreitung und dem Gewicht der Elektrofahrzeuge, entsprechend dem oben dargestellten Schema der Regulierung. Zusätzliche Effekte entstehen in der Phase-In-Periode durch die unterschiedliche Teilberücksichtigung der Neufahrzeugflotten und durch die Mehrfachzählung der Elektrofahrzeuge: Die Mehrfachzählung führt bis 2015 zu einer überproportionalen Anrechnung der Elektrofahrzeuge, außerdem bis einschließlich 2014 zu einer Mindereinbeziehung der herkömmlich angetriebenen Fahrzeuge.

Wegen der Ausrichtung der Abgabenhöhe an der Differenz der Durchschnittswerte von Soll und Ist der spezifischen CO₂-Emissionen lässt sich der Kompensationswert von Elektrofahrzeugen leicht ermitteln. Jedes zusätzliche Elektrofahrzeug (mit dem festgelegten Standardgewicht) kompensiert aufgrund der Mehrfachberücksichtigung zunächst (2012 und 2013) 455 g CO₂/km aus den Emissionen der übrigen Fahrzeuge, dann 325 g CO₂/km im Jahr 2014, sowie 195 g CO₂/km im Jahr 2015, bis der Kompensationswert auf die 130 g CO₂/km bei einfacher Zählung ab 2016 fällt. Wie sich der Kompensationsbedarf auf einzelne herkömmlich

che Fahrzeuge oder Fahrzeugmodelle des jeweiligen Herstellers verteilt, ist dabei völlig unerheblich, da auch die Abgabelast wegen der Durchschnittsbildung diesbezüglich völlig neutral ist. Gestützt auf diese Festlegungen zum Kompensationspotenzial der Elektrofahrzeuge lässt sich ermitteln, in welchem Umfang jedes einzelne Elektrofahrzeug die Abgabelast des jeweiligen Herstellers mindert, abhängig vom Verfehlungsbereich, den seine Fahrzeuge im Durchschnitt aufweisen.

Tabelle: Minderung der Abgabelast pro Elektrofahrzeuge nach dem Umfang der ohne Berücksichtigung der Elektrofahrzeuge realisierten durchschnittlichen Verfehlung des Sollwerts pro Fahrzeug in g CO₂/km

Jahr	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Verfehlungsbereich	Minderung der Abgabelast								
0 - 1 g	2.275 €	2.275 €	1.625 €	975 €	650 €	650 €	650 €	12.350 €	12.350 €
1 - 2 g	6.825 €	6.825 €	4.875 €	2.925 €	1.950 €	1.950 €	1.950 €	12.350 €	12.350 €
2 - 3 g	11.375 €	11.375 €	8.125 €	4.875 €	3.250 €	3.250 €	3.250 €	12.350 €	12.350 €
ab 3 g	43.225 €	43.225 €	30.875 €	18.525 €	12.350 €	12.350 €	12.350 €	12.350 €	12.350 €

Annahme: Standardgewicht des Elektrofahrzeuge ($M_0 = 1.372$ kg 2012-2015, fortgeschriebener Wert für M_0 ab 2016); angestrebte Absenkung der Sollwerte ab 2020 nicht berücksichtigt

• **Einordnung der Regelung**

Von der Wirkung her können die dargestellten Minderungspotenziale für die Abgabelasten der einzelnen Hersteller mit Subventionen für Elektrofahrzeuge gleichgestellt werden, soweit die einzelnen Hersteller ohne Berücksichtigung der Elektrofahrzeuge wegen der Verfehlung der sie betreffenden Sollwerte abgabepflichtig sind. Bei marginalen Überschreitungen der jeweiligen Sollwerte der durchschnittlichen CO₂-Emissionen sind die Potenziale zur Abgabeminderung durch Elektrofahrzeuge für die einzelnen Hersteller zwar verhältnismäßig gering und im Zeitverlauf bis 2016 noch einmal deutlich absinkend. Soweit jedoch die jeweiligen Sollwerte etwas deutlicher verfehlt werden, steigen die Kostensenkungspotenziale durch Abgabeminderung erheblich an und erreichen – zumal in der Anfangszeit – ganz erstaunliche Höhen.

- Hersteller, die bei Rechnung ohne Elektro-PKW auf eine durchschnittliche Sollwert-Verfehlung ihrer PKW von 1 – 2 g CO₂/km kommen, können – in den ersten Jahren – mit einer Kostenentlastung pro Elektrofahrzeuge rechnen, die im etwa gleichen Bereich liegt wie die direkten Subventionen in jenen Ländern, die die Anschaffung von Elektro-PKW substantziell fördern.
- Hersteller, die bei Rechnung ohne Elektro-PKW auf eine durchschnittliche Sollwert-Verfehlung ihrer PKW von 2 – 3 g CO₂/km kommen, können – in den ersten Jahren – mit einer Kostenentlastung pro Elektrofahrzeuge rechnen, die im etwa gleichen Bereich liegt wie die typischen (gegenwärtigen) Mehrkosten der Herstellung eines Elektro-PKW gegenüber einem herkömmlich angetriebenen PKW.
- Hersteller, die bei Rechnung ohne Elektro-PKW auf eine durchschnittliche Sollwert-Verfehlung ihrer PKW von 3 g CO₂/km und mehr kommen, können – in den ersten Jahren – mit einer Kostenentlastung pro Elektrofahrzeuge rechnen, die im etwa gleichen Bereich liegt wie die typischen (gegenwärtigen) Listenpreise von Elektro-PKW, also deutlich oberhalb der Herstellkosten. Dies stellt in der Tat einen außerordentlich hohen Anreiz dar.

- Dazu kommt noch eine weitere Kostenentlastung in den Anfangsjahren aufgrund der geringeren Einbeziehung herkömmlicher Fahrzeuge in die Sollwertberechnung, soweit Elektrofahrzeuge zu berücksichtigen sind. Diese stark von der Modellzusammensetzung der einzelnen Hersteller abhängige Größe dürfte in der Regel eher von nachrangiger Bedeutung sein, sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden.
- Ab 2019, wenn jedwede Sollwertverfehlung in gleicher spezifischer Höhe abgabebewehrt ist und die Phase-In-Elemente (Teilberücksichtigung der angerechneten Flotten; mehrfache Anrechnung der Elektrofahrzeuge) ausgelaufen sind, ergibt sich eine subventionsgleiche Abgabekürzung in beträchtlicher Höhe, die in erheblichen Marktsegmenten die erwarteten Mehrkosten von Elektro-PKW gegenüber herkömmlich angetriebenen PKW deutlich überschreiten sollten.

- ***Mögliche Wirkung der Regelung***

Auf diese Sachlage können sich die einzelnen Hersteller in unterschiedlicher Form einstellen. Grundsätzlich können sie anstreben, auch ohne Elektrofahrzeuge die sie betreffenden Sollwerte einzuhalten, um die Abgabeverpflichtung zu vermeiden, oder auch darüber hinausgehend die sie betreffenden Sollwerte zu unterschreiten mit dem Ziel, aus Emissionsgemeinschaften mit anderen Herstellern ökonomischen Nutzen zu ziehen. Aufgrund der Tarifstruktur des Abgabeansatzes ergibt sich ein besonderer Anreiz, (a) Sollwertüberschreitungen bei der durchschnittlichen CO₂-Emission pro km von mehr als 3 g zu mindern oder gänzlich zu vermeiden, sowie (b) ab 2019 generell Sollwertüberschreitungen zu vermeiden.

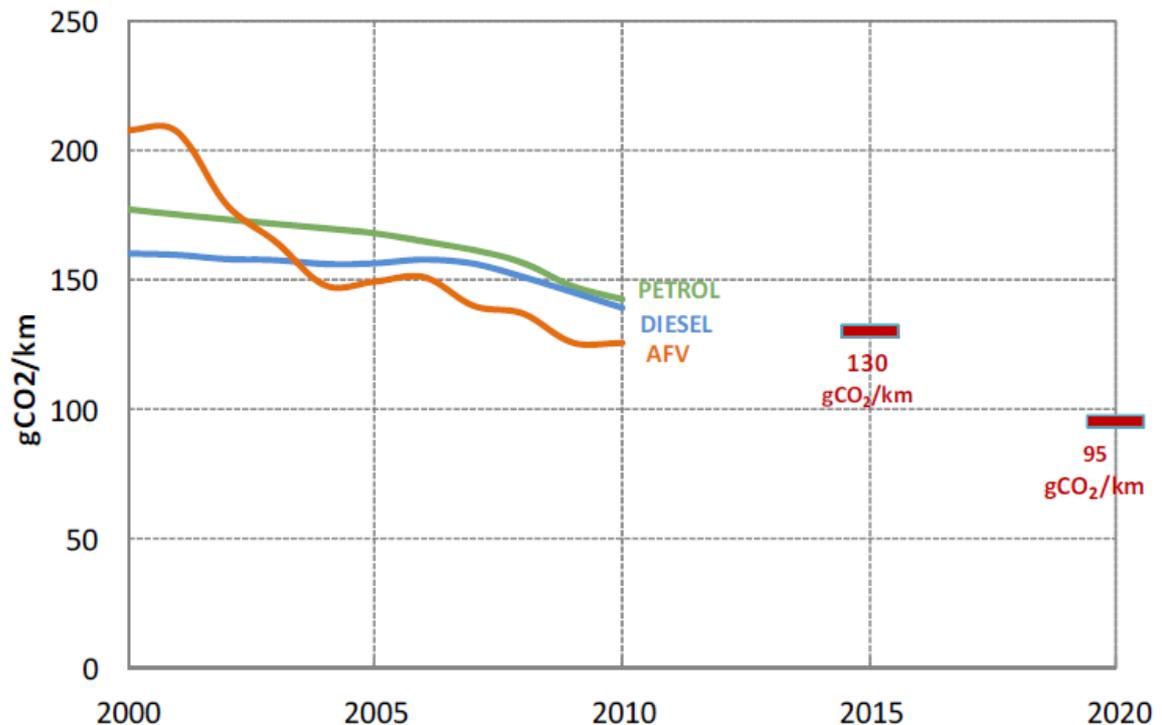
Soweit andererseits ein Hersteller die ihn betreffenden Sollwerte ohne Elektrofahrzeuge nicht einhält und entsprechend abgabepflichtig ist, kann er durch Elektrofahrzeuge die Überschreitung und die Abgabelast mindern, ggf. auch durch Bildung einer Emissionsgemeinschaft mit einem Hersteller mit niedrigeren Emissionswerten, insbesondere z.B. auch mit einem Hersteller von Elektrofahrzeuge. Aufgrund der in diesem Fall enorm hohen Abgabeminderung um 43.225 Euro je Elektrofahrzeuge (in den Jahren 2012 und 2013) bzw. 30.875 Euro (im Jahr 2014) erscheint es plausibel, dass Überschreitungen der Sollwerte für das Durchschnittsfahrzeug um mehr als 3 g CO₂/km so weit wie möglich durch die Einbeziehung von Elektrofahrzeuge vermieden werden. Aber auch über das Jahr 2014 hinaus oder in der niedrigeren Abgabestufe einer Sollwertverfehlung von 2 – 3 g CO₂/km stellen die Abgabeminderungen von teils deutlich über 10.000 Euro pro Elektrofahrzeuge einen erheblichen Anreiz dar, zusätzliche Elektrofahrzeuge zu vermarkten.

- ***Möglicher Umfang der Inanspruchnahme der Kompensationspotenziale***

Noch nicht zuverlässig einschätzen lässt sich derzeit der zu erwartende Kompensationsbedarf von Sollwertüberschreitungen seitens der einzelnen verschiedenen Hersteller. Der gemäß Art. 13 zum 31.10.2011 fällige erste Monitoring-Bericht der Europäischen Kommission über das Jahr 2010 liegt noch nicht vor, wohl aber eine Zusammenstellung und Auswertung der vorläufigen Daten durch die Europäische Umweltagentur (vgl. European Environment Agency: Monitoring the CO₂ emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2010, sowie die zugehörigen Datenbanken, unter: www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission). Die Datenbank mit den vorläufigen Daten unterscheidet, insbesondere auch wegen der länderweisen Differenzierung, fast 290.000 Fahrzeugvarianten, allein in Deutschland rd. 22.000. Die Auswertung differenziert zwar nach Ländern, nicht aber

nach Herstellern; außerdem werden die Phase-In-Prozentsätze, wie auch die Abschläge für Ökoinnovationen und die Mehrfachanrechnung von Elektrofahrzeuge nicht berücksichtigt.

Abbildung: Entwicklung der CO₂-Emissionen neuer PKW in der EU27 nach Antriebsart



Anmerkung: Petrol = Ottomotor; Diesel = Dieselmotor; AFV = alternative Antriebe; Quelle: European Environment Agency: Monitoring the CO₂ emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2010

Die Gesamtbetrachtung, vgl. die vorstehende Abbildung, legt nahe, dass bei Trendfortsetzung alle Hersteller zusammen den für 2015 für alle Fahrzeuge formulierten Zielwert von 130 g CO₂/km einhalten werden; bei Aufrechterhaltung der historischen Streuung zwischen den Herstellern sind dagegen für einzelne Hersteller mehr oder weniger deutliche Abweichungen und darauf gerichtete Reaktionen zu erwarten.