



Der Beitrag des Elektroautos zum Klimaschutz

Wunsch und Realität

Dr. Axel Friedrich, Dr. Rudolf Petersen

Im Auftrag der Delegation DIE LINKE im Europäischen Parlament

November 2009

Inhaltsverzeichnis

1. Notwendigkeiten der Reduktion der Klimagasemissionen

1.1 Klimawandel ist Realität

1.2 Risiken einer unzureichenden Klimagasminderung

1.3 Entwicklungspfade für Energieverbrauch und Klimaschutz

2. Technische Aspekte des elektrischen Antriebes für Straßenfahrzeuge

2.1 Heutiges Konzept: Flüssigkraftstoff – Verbrennungsmotor

2.2 Alternativen zum Benzin- und Dieselantrieb

2.3 Besondere Merkmale des Konzeptes Batterie/Elektromotor

2.4 Verkehrliche Rahmenbedingungen für Elektroautos

3. Beitrag von Elektroautos zum Klimaschutz

3.1 Heutige sowie kurz- bis mittelfristige Situation

3.2 Kosten des Elektro-Autos und Konsequenzen für den Klimaschutz

4. Motivationen der Beteiligten

4.1 Politik

4.2 Autoindustrie

4.3 Stromindustrie

5. Das Ökoargument: Elektroautos für die regenerative Stromerzeugung

5.1 Das erste Argument (nochmals): Elektrofahrzeuge als Null-Emissions-Autos

5.2 Der genaue Vergleich: Elektroantrieb gegen Otto-/Diesel-Motor, Energie- und Klimavergleich

5.3 Perspektiven der zukünftigen Stromerzeugung

5.4 Das zweite Ökoargument: E-Autos als Netzpuffer

6. Zusammenfassung

1. Notwendigkeiten der Reduktion der Klimaemissionen

1.1 Klimawandel ist Realität

Fast täglich erscheinen Berichte über Naturkatastrophen in den Nachrichten. Überflutungen in den Philippinen, Vietnam und Bangladesch, lang anhaltende Trockenheitsperioden in Indien oder China sind nur die besonders herausragenden Katastrophen. In vielen Teilen der Erde sind die Zeichen des Klimawandels sichtbar. Es ist heute wissenschaftliche Erkenntnis, dass diese Änderungen vom Menschen verursacht werden. Dabei spielen diese ansteigenden Klimagasemissionen die Hauptrolle. Letzte Modellierungen gehen von bis zu 4 Grad Erhöhung der globalen Temperatur bis zum Jahre 2060 aus, für die Arktis sogar von bis zu 10 Grad, verglichen mit dem vorindustriellem Niveau, wenn sich die globalen Klimagasemissionen weiter entwickeln wie bisher.

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) der UNO ist im 4. Assessment der Arbeitsgruppe II zu wichtigen Feststellungen gelangt, welche vor allem Studien seit 1970 umfassen. Beobachtungen aus allen Kontinenten und den meisten Ozeanen zeigen, dass viele Ökosysteme durch den regionalen Klimawandel, besonders durch den Temperaturanstieg betroffen sind. In Bezug zu den Änderungen Schnee- und Eisbedeckung und gefrorener Boden (einschließlich Permafrost) gibt es eine hohe Zuverlässigkeit, dass die natürlichen Systeme beeinflusst werden.

Beispiele dafür sind:

- Vergrößerung und Erhöhung der Anzahl der Gletscherseen;
- wachsenden Bodeninstabilität in Permafrostregionen, und ansteigende Steinlawinen in Gebirgsregionen;
- Veränderungen in einigen arktischen und antarktischen Ökosystemen.

Beruhend auf einer wachsenden Datengrundlage gibt es eine hohe Zuverlässigkeit für die folgenden Veränderungen der hydrologischen Systeme, die weltweit betroffen sind:

- angestiegene Abflüsse und frühere Frühlingsmaximumabflüsse in vielen gletscher- und schneegespeisten Flüssen,
- Erwärmung von Seen und Flüssen in vielen Regionen mit Auswirkungen auf

die thermische Struktur und Wasserqualität.

Es gibt eine hohe Zuverlässigkeit, basierend auf erweiterter Datenbasis mit mehr Spezies, dass die Erwärmung in der letzten Vergangenheit biologische terrestrische Systeme massiv beeinflusst. Dies beinhaltet Veränderungen wie:

- frühere Frühlingsbeginnanzeichen wie Blätterbildung, Zugvogelankunft und Eierlegen;
- Ausdehnung von Pflanzen- und Tierarten in Richtung der Pole und in größere Höhen in den Gebirgen.

Basierend auf Satellitenbeobachtungen seit den frühen 1980igern, gibt es hohe Zuverlässigkeit für den Trend, dass in vielen Regionen das frühere „Begrünen“ im Frühling zu einer längeren Vegetationsperiode führt, verursacht durch die Erwärmung.

Basierend auf neuen Datengrundlagen gibt es eine hohe Zuverlässigkeit, dass die in marinen Gewässern und Süßwasser beobachteten Veränderungen von biologischen Systemen verknüpft sind mit den steigenden Wassertemperaturen sowie mit den Veränderungen der Eisbedeckung, der Salinität, des Sauerstoffgehaltes und der Zirkulation. Diese Veränderungen sind z.B.:

- Verschiebungen der Ausdehnung und Veränderungen von Algen, Plankton und Fischvorkommen in den Breitengraden nahe zu den Polen;
- Änderungen der Ausbreitung und frühere Fischwanderungen in Flüssen.

Durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas entsteht Kohlendioxid, das sich in der Atmosphäre anreichert. Darüber hinaus werden jedoch noch weitere klimarelevante Stoffe bei der Verbrennung freigesetzt, z.B. Lachgas, Methan, Ruß oder die Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung, Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide. Aber auch weitere Emissionen wie zum Beispiel Lachgas und Methan aus der Landwirtschaft spielen eine wichtige Rolle bei der Klimaveränderung.

Der letzte Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahre 2007 beinhaltet die wissenschaftlichen Grundlagen der Klimaänderungen sowie die Schätzung der Auswirkung von Politikoptionen zur Reduktion der Klimagasemissionen. Unter den

Wissenschaftlern besteht weitgehende Übereinstimmung, dass der globale Temperaturanstieg auf max. 2 Grad Celsius, verglichen mit dem vorindustriellen Niveau, begrenzt werden muss. Gelingt dies nicht, sind dramatische Veränderungen auf der Erde zu erwarten, die weit über das hinausgehen, was wir bisher schon registrieren.

Die Klimamodelle errechnen aus dieser 2-Grad-Schwelle eine mindestens 50%ige Reduzierung der globalen Klimagasemissionen bis 2050. In Klimagasemissionen pro Kopf umgerechnet bedeutet dies maximal 2 t CO₂ Äquivalente pro Jahr. Zum Vergleich: Die Emissionen eines Deutschen betragen zurzeit ca. 10 t, die eines Amerikaners mehr als 20 t. Da jedoch die Entwicklungsländer ein Recht auf weitere wirtschaftliche Entwicklung haben, müssen die entwickelten Länder ihre Klimagasemissionen drastisch verringern.

Für Deutschland bedeutet dies mindestens 80% Reduktion, bezogen auf 1990. Dies gilt jedoch nur, wenn heute schon mit der Klimagasminderung begonnen wird. Je später die Minderungsanstrengungen beginnen, desto stärker muss die Minderung ausfallen, da die schon emittierten Klimagase sehr lange in der Atmosphäre verbleiben. Man kann hier von einer Klimagasbank sprechen; d. h. man kann nicht bis 2045 weiter machen und die letzten 5 Jahre zur Minderung benutzen.

1.2 Risiken einer unzureichenden Klimagasminderung

Unsere Kenntnisse über die Reaktionen des Klimas auf die erhöhten Klimagaskonzentrationen in der Atmosphäre sind immer noch nicht ausreichend. Vor allem die Möglichkeiten von kurzfristigen abrupten Änderungen sind bisher nicht vorherzusagen. Stellvertretend für solche Phänomene sei die Änderung des Golfstromes genannt. Die durch nichtlineare Abläufe hervorgerufenen Änderungen entziehen sich noch der Modellierung. Solche Umkehrpunkte¹ haben die Eigenschaft, schnell und vor allem unumkehrbar in menschlichen Zeiträumen aufzutreten.

Die UN Umweltorganisation UNEP hat vor kurzen Alarm geschlagen. In dem *Climate Change Science Compendium 2009* „*EARTH'S ICE*“ wird auf die dramatische und

¹ englisch „tipping points“

sich beschleunigende Verringerung der Gletscher in Gebirgen wie Alpen oder Himalaja, das schnelle Schrumpfen des arktischen Eises, die Instabilität der Eisschelfs und die wachsende Schmelzgeschwindigkeit der großen Eismassen der Erde, Grönland, Westantarktis und Ostantarktis hingewiesen. Beunruhigend ist vor allem, dass dieser Prozess deutlich schneller abläuft, als die Klimamodelle dies vorausgesagt haben.

Diese dramatischen Änderungen haben weitreichende Konsequenzen. Die Abflüsse der Gletscher bilden in vielen Teilen der Erde die Grundlage für die Wasserversorgung, die Landwirtschaft, die Stromerzeugung oder die Schifffahrt. Die Lebensgrundlage von mehr als hundert Millionen Menschen ist dadurch bedroht.

Aber auch in unseren Regionen hat der Rückgang der Alpengletscher große wirtschaftliche Auswirkungen. Auch wenn schnell drastische Klimagasreduktionsprogramme gestartet würden, ist der Klimawandel nicht mehr aufzuhalten, nur zu verlangsamen, weil die schon bisher in die Atmosphäre abgegebenen Emissionen dort eine sehr lange Verweilzeit haben. Bis die bis heute emittierten CO₂-Emissionen vollständig abgebaut sind, dauert es mehr als 1000 Jahre. Deshalb sind neben den Minderungsmaßnahmen auch Anpassungsmaßnahmen zu treffen. Die Weltbank schätzt die Kosten in einer neuen Studie für die Klimaanpassung in den ärmsten Ländern der Erde in den Jahren 2010 bis 2050 jährlich auf 75 bis 100 Milliarden US-Dollar, um diese Länder vor den schlimmsten Folgen der Erderwärmung zu schützen. Zum Vergleich: Diese Kosten sind etwa so hoch wie die gegenwärtige weltweite Entwicklungshilfe². Diese Ausgaben werden benötigt, um durch Maßnahmen die Folgen des Klimawandels wie Hitzewellen, Dürren, Stürme, Überschwemmungen und andere extreme Wetterereignisse zu verringern.

² "The Economics of Adaptation to Climate Change (EACC)", 2009, <http://beta.worldbank.org/climatechange/content/economics-adaptation-climate-change-study-homepage>

1.3 Entwicklungspfade für Energieverbrauch und Klimaschutz

Weltweite Trends

Die internationale Energieagentur IEA gibt jährlich den „World Energy Outlook“ heraus; darin wird die Entwicklung des Energieverbrauches in den verschiedenen Sektoren auf den erwarteten Entwicklungspfaden in den nächsten 20 Jahren dargestellt. Im Bild 1 ist zu erkennen, dass ein weiterhin starkes Wachstum des Energieverbrauches weltweit erwartet wird. D.h. die Entwicklung der vergangenen Jahre wird beschleunigt fortgesetzt und führt im Jahre 2030 zu einem 45% höheren Energieverbrauch als heute.

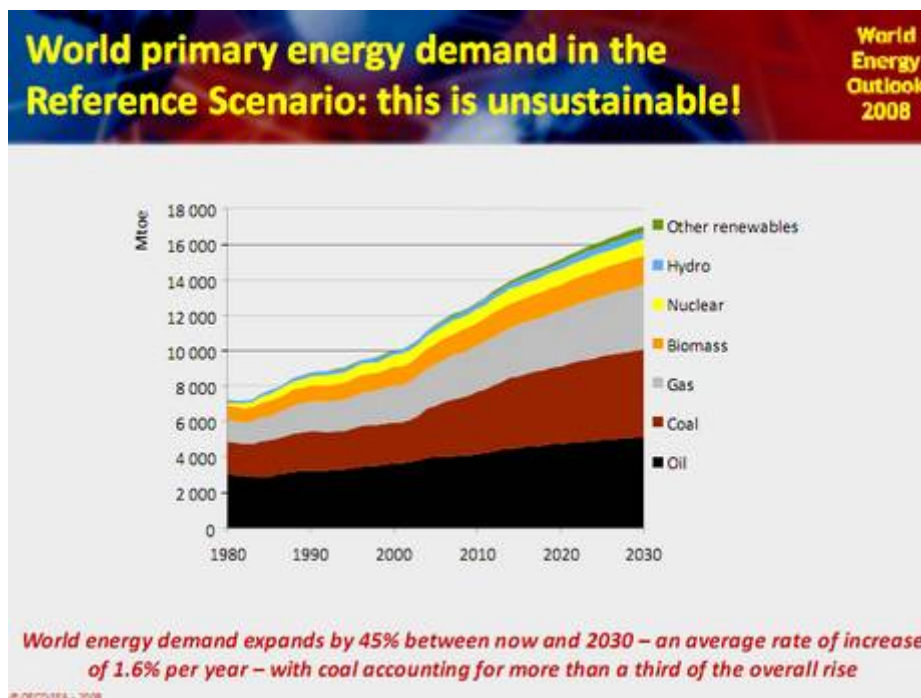


Bild 1: Weltweiter Primärenergieverbrauch (Referenzszenario)

Die IEA stellt in dem Bericht fest, dass diese Entwicklung nicht nachhaltig ist und den Notwendigkeiten des Klimawandels widerspricht. Diese Entwicklung führt zu einer starken Erhöhung der CO₂-Emissionen, statt - wie notwendig - zu einer Reduktion.

Energy-related CO₂ emissions in the Reference Scenario

World
Energy
Outlook
2008

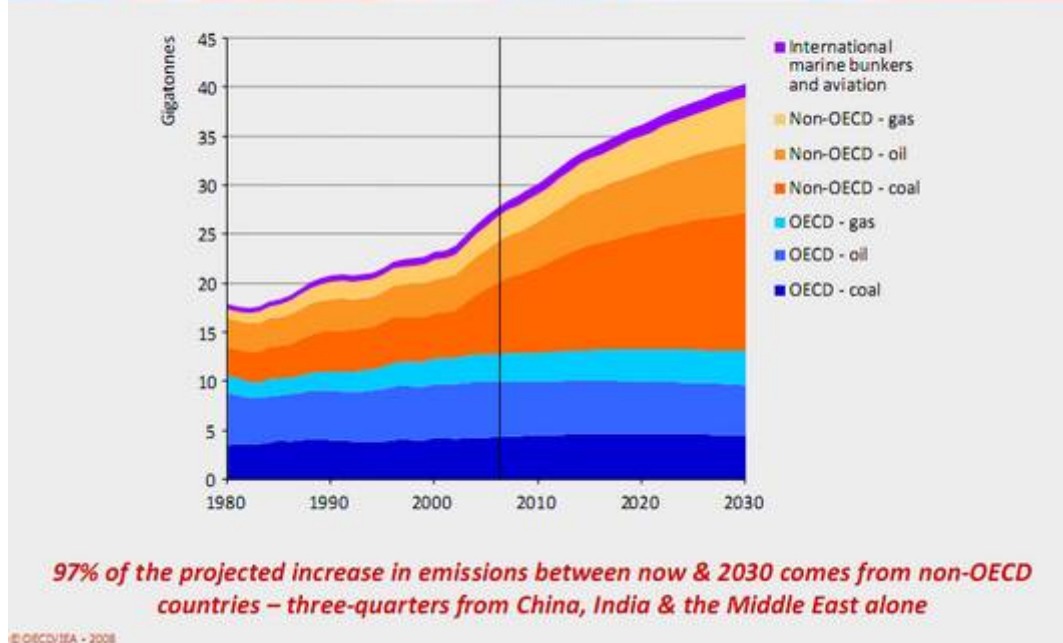


Bild 2: Energiebezogene Kohlendioxid-Emissionen im Referenzszenario

Auch der Verbrauch von Rohöl steigt weiter an, vor allem getrieben durch eine weitere Motorisierung weltweit. Der absolut größte Rohölverbrauchsanstieg findet danach in China, dem mittleren Osten und in Indien statt.

In West-Europa und in den USA wird dagegen mit einer Verringerung des Ölverbrauches gerechnet, die jedoch so gering ausfällt, dass sie Anstiege in anderen Regionen der Erde bei weitem nicht kompensieren kann.

Change in oil demand by region in the Reference Scenario, 2007-2030

World
Energy
Outlook
2008

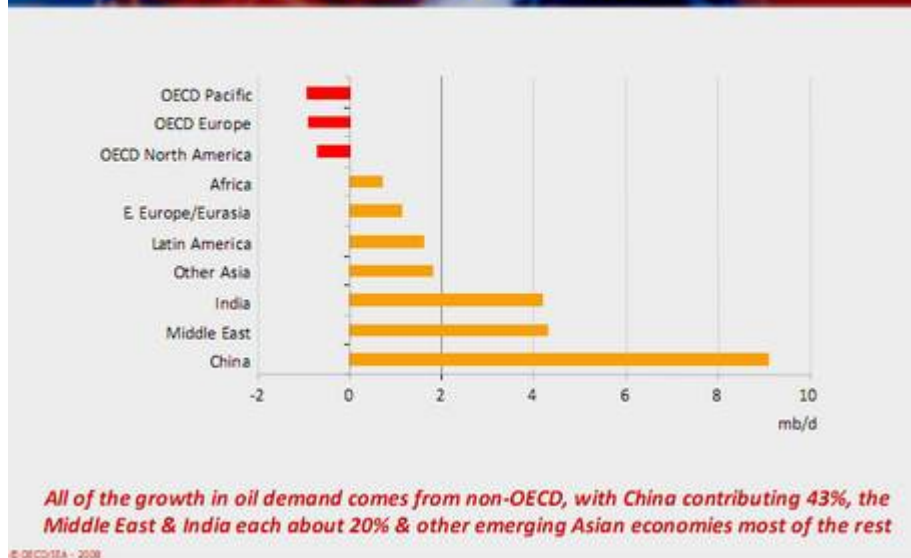


Bild 3: Änderung der Rohölnachfrage im Referenzszenario nach Regionen 2007-2030

Der Verbrauchsanstieg wird zum größten Teil durch den Verkehr erzeugt. Die anderen Sektoren spielen keine große Rolle.

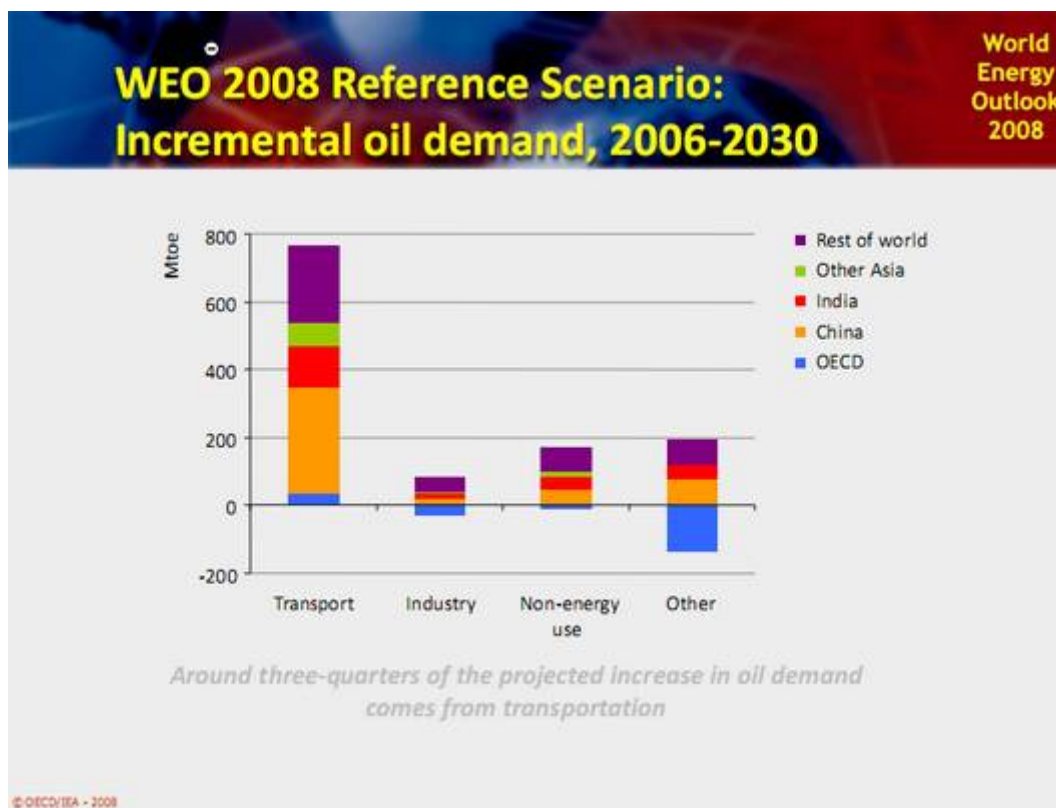


Bild 4: Zusätzlicher Rohölbedarf 2006-2030

Es stellt sich natürlich die Frage, woher diese steigenden Rohölmengen kommen werden. In vielen Erdölregionen hat die Förderung des Öls das Maximum bereits überschritten. Zwar werden gelegentlich noch neue Lagerstätten gefunden, deren Kapazität ist im Verhältnis zu den heutigen Gesamtfördermengen vernachlässigbar gering. Neue verbesserte Technologien erlauben eine höhere Ausbeute der vorhandenen Lagerstätten, aber dies vermag das Problem nur wenige Jahre zu verschieben.

Bei höheren Preisen wird die Suche und Förderung in schwierigen geologischen Feldern immer profitabler werden, wahrscheinlich werden z. B. in der Tiefsee noch neue Funde gelingen. Das Öl wird aber erheblich teurer werden, und die grundsätzliche Problematik der Begrenztheit der Ressource „Öl“ wird bestehen bleiben.

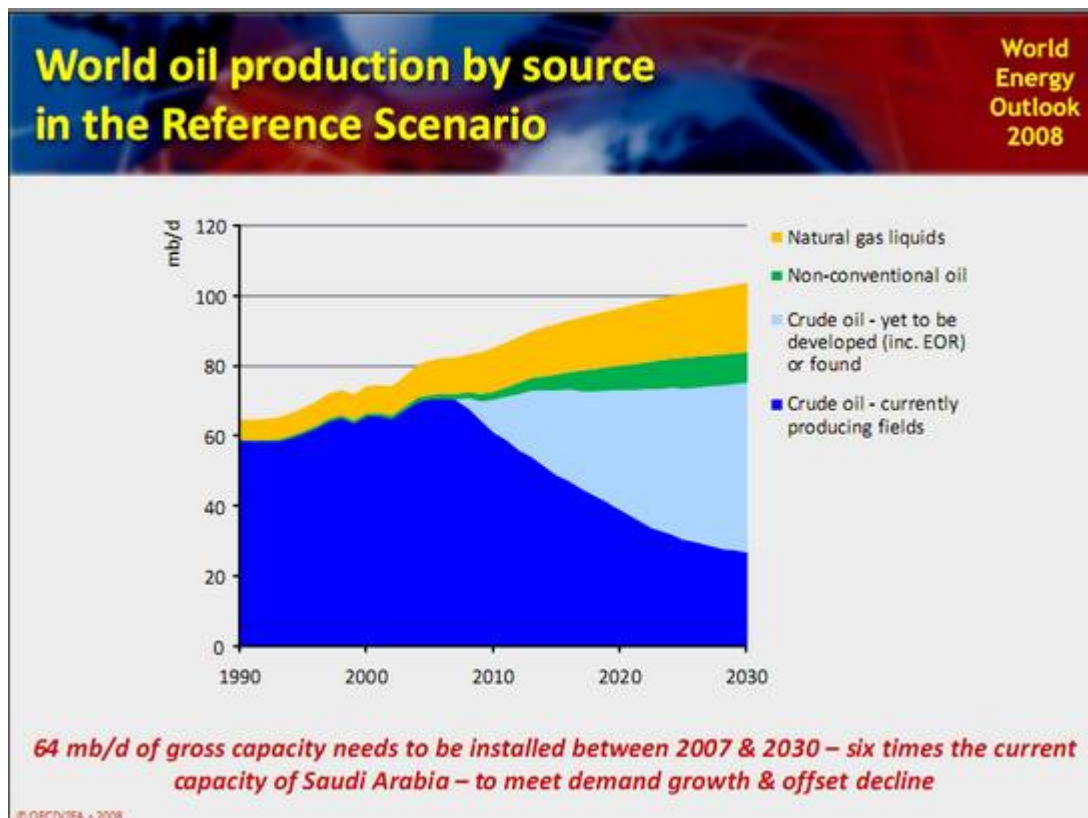


Bild 5: Vorstellungen der IEA zur zukünftigen Ölproduktion (mit Flüssiggas)

Seit einigen Jahren sind die sog. „nichtkonventionellen“ Ölreserven, wie z.B. Schweröle, auch Öl aus Teersänden und –schiefer kommerziell interessant geworden³. Synthetische Kraftstoffe, gewonnen durch die Umwandlung von Erdgas in Diesel oder Benzin mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese sollen für die zukünftige Versorgung einen wesentlichen Beitrag liefern.

Bei diesen „Ölhoffnungen“ sind zwei grundsätzliche Probleme zu bedenken:

1. Zu den neuen Funden: Im großem handelt es sich um erwartete Ressourcen, deren Umfang nicht ermittelt, sondern geschätzt wurde. Es ist nicht sicher, dass die erwarteten Vorkommen wirklich gefunden werden und ausgebeutet werden können,
2. Mit der Förderung der nichtkonventionellen Rohölreserven sind erhöhte CO₂-Emissionen und andere Umweltbelastungen verbunden.

³ Kanada hat sich 2007 mit der Umbenennung seiner Öl-Sand- und –Schiefer in „Ölressourcen“ gegenüber der Internationalen Energie-Agentur schlagartig mit 174 Milliarden Barrel Ölvorräten auf Platz 2 der Ölländer positioniert (nach Saudi Arabien). Siehe IEA 2007, IEA 2008

Zu Punkt 2: Bei der Ausbeutung der kanadischen Teersände und Ölschiefer mit Heißwasser und hohem Druck treten erhebliche regionale Umweltprobleme auf, und die schlechte Energiebilanz führt – gegenüber der heutigen Situation – zu einem deutlichen Anstieg der spezifischen und der absoluten Treibhausgas-Emissionen. Eine umfassende Ausbeutung dieser Vorräte würde Kanadas Klimabilanz um geschätzte 25 % verschlechtern und wird daher nicht stattfinden.

Die europäische Entwicklung

Auch in Europa sind die Energieträger mit ähnlichen Anteilen am Energieverbrauch und an den CO₂ Emissionen beteiligt. Nach Angaben der Europäischen Umweltagentur (EEA) betrug der Anteil des Öls ca. 36%; dies werde sich bis 2030 nicht wesentlich ändern.

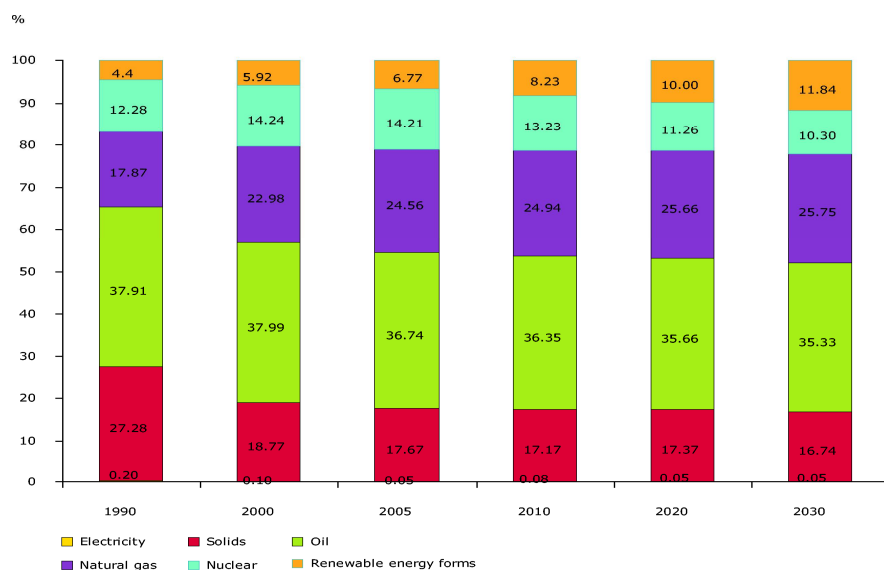


Bild 6: Struktur des Energieverbrauches in den EU27 Mitgliedsländern von 1990 bis 2005 und die vorhersagten Strukturen in 2030 (Quelle. EEA 2009)

Der Verkehrssektor hat in Europa überproportionale Wachstumsraten im Vergleich mit anderen Sektoren verzeichnet.

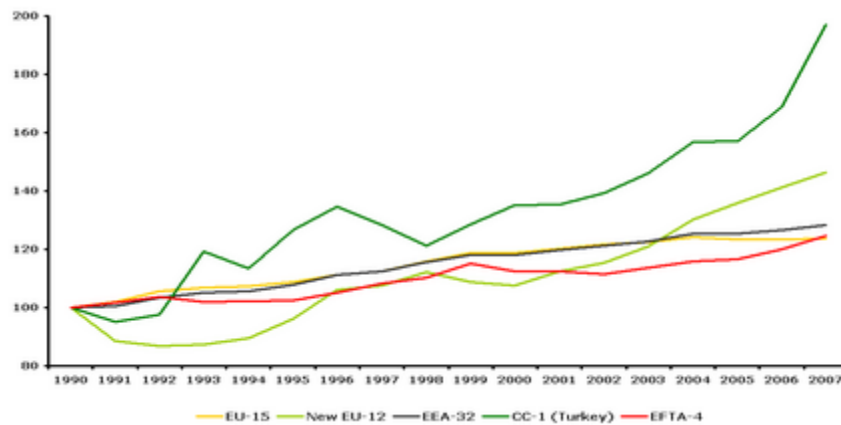


Bild 7: Gesamte Klimagas-Emissionen des Verkehrs in der EU (Quelle: EEA 2009)

Dass die Mitgliedsstaaten der EU sich bei der Minderung der Treibhausgas-Emissionen des Verkehrs sehr unterschiedlich entwickelt haben, wird in der nächsten Grafik (Bild 8) deutlich: Nur 4 Länder haben in der Zeit von 1990 bis 2006 eine Reduktion der Klimagasemissionen des Verkehrs erzielt. Davon sind bei 3 Staaten die Minderungen durch die wirtschaftlichen Umwälzungen im Zuge des Zusammenbruchs des Ostblockes zu erklären. Nur Deutschland kann eine durch Politik erzielte Verminderung der Klimagasemissionen des Verkehrs berichten. Dabei darf nicht übersehen werden, dass durch das Gefälle der Kraftstoffsteuer zu einigen Nachbarländern Tanktourismus die Bilanz Deutschlands geschönt wird, da nach der Rechenmethode des Kyoto- Protokolls die im Land getankten, nicht die im Land verbrauchten Mengen dem Land angerechnet werden.

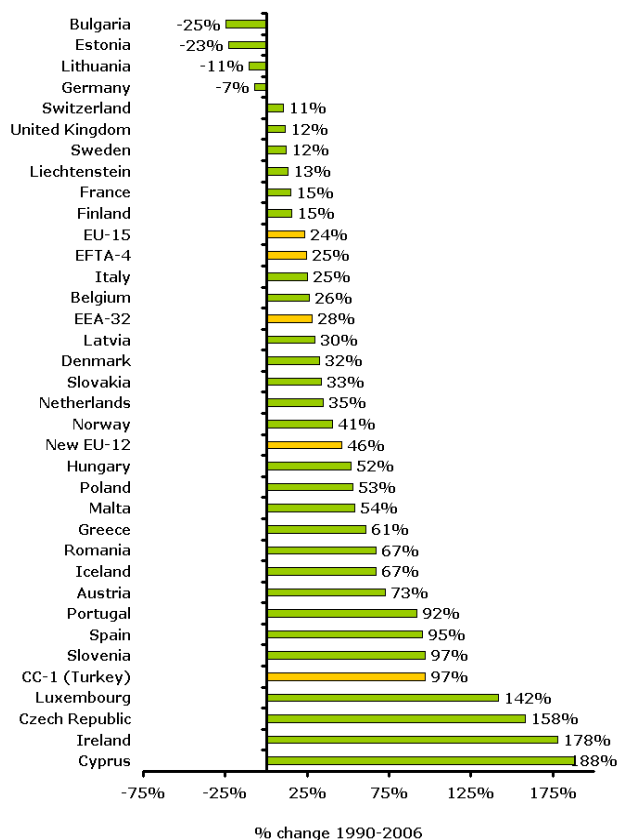


Bild 8: Änderung der verkehrsbedingten CO₂ Emissionen der EU-Mitgliedstaaten von 1990 bis 2006 (Quelle: EEA 2009)

In Europa mit einer alternden Gesellschaft werden voraussichtlich die Verbrauchsanstiege in Mittel- und Südeuropa in der Zukunft gestoppt werden. Dabei spielen neben dem veränderten Mobilitätsverhalten von älteren Menschen (kein Berufs- und Geschäftsverkehr) CO₂-Grenzwerte eine zentrale Rolle, um kostengünstig eine Reduktion zu erreichen. Ab 2015 werden die Kohlendioxidemissionen pro Pkw auf 130 g/km begrenzt. Die EU-Richtlinie sieht vor, diesen Grenzwert in 2020 auf 95 g/km CO₂ zu senken. Analoge Grenzwerte für leichte Nutzfahrzeuge sind in der Verabschiedung. Die EU Kommission plant auch die Einführung von CO₂-Grenzwerten für schwere Nutzfahrzeuge. Darüber hinaus sind jedoch andere Maßnahmen, wie z.B. Ausbau des ÖPNV, Verbesserung der Rahmenbedingungen für den nichtmotorisierten Verkehr und Veränderung der steuerlichen Rahmenbedingungen wichtig.

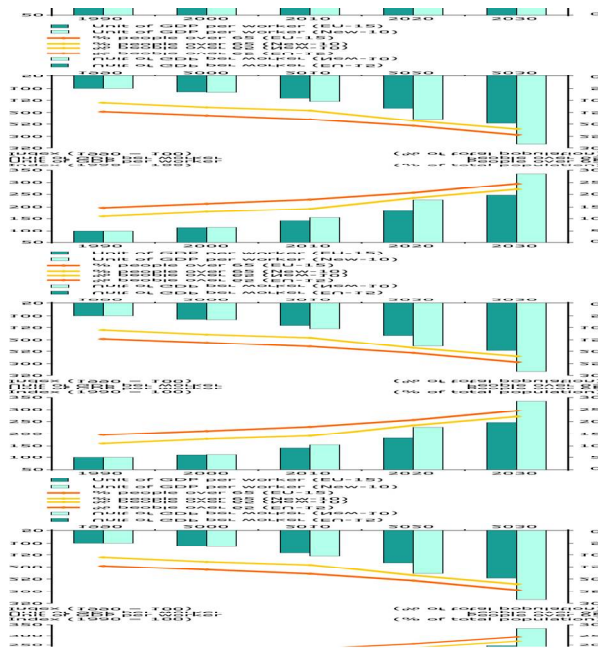


Bild 9: Altersanteil der Personen über 65 an der Gesamtbevölkerung und Anforderungen für die Einkommenserzeugung pro arbeitende Person (Quelle: European Environment Outlook EEA 2005)

Aber alle diese Entwicklungen reichen bei weitem nicht aus, die durch die Klimakatastrophe notwendigen Minderungen zu erzielen. Als entwickelte Länder haben die Staaten Europas, neben den USA und Japan, Verpflichtungen, ihre Klimagasemissionen des Verkehrs drastisch zu verringern und Lösungen zu entwickeln, die auch für Entwicklungsländer tragfähig sind.

In der Vergangenheit lag der Schwerpunkt der Vorschläge der Autoindustrie auf der Umstellung des Energieträgers, da dadurch kein grundlegender Wandel unseres Verkehrssystems notwendig würde.

Nach staatlich geförderten Versuchen in den 80iger und 90iger Jahren mit Methanol und Ethanol und dem ersten Großversuch mit Elektroautos wurde später der Einsatz von Biokraftstoffen und Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen gefördert. Als deutlich wurde, dass die Brennstoffzellentechnologie noch für lange Zeit kommerziell nicht verfügbar sein wird und auch die Frage nicht geklärt wurde, wie der Wasserstoff kostengünstig erzeugt und gespeichert werden kann, wurde die

Hoffnung in die Biokraftstoffoption gesetzt, obwohl das Umweltbundesamt schon 1993 vor den Umweltauswirkungen gewarnt hatte.

Nachdem die Diskussion über die Wirkungen der verstärkten Nutzung von Biokraftstoffen die Politik und die breite Öffentlichkeit auch im Zusammenhang mit den steigenden Nahrungsmittelpreisen erreicht hatte, wurde die Option Elektroauto wieder aktuell.

2. Technische Aspekte des elektrischen Antriebes für Straßenfahrzeuge

2.1 Heutiges Konzept: Flüssigkraftstoff - Verbrennungsmotor

Vor rund 100 Jahren konnte sich der Verbrennungsmotor zum Antrieb von Straßenfahrzeugen am Markt durchsetzen; die Konkurrenten Elektromotor und Dampfmaschine verschwanden innerhalb weniger Jahre von den Straßen, nachdem ihre Anteile in den Jahrzehnten vor 1910 noch erheblich waren.

Maßgeblich für den Erfolg des – damals ausschließlich mit Benzin betriebenen - Verbrennungsmotors nach dem Otto-Prinzip war die Leistungsdichte des Kraftstoffes, die zum einen lange Fahrstrecken und zum anderen hohe Motorleistungen erlaubte. Dampfmaschinen waren weniger kompakt zu bauen, und ihre Inbetriebnahme war komplizierter. Die Schwäche des Elektroantriebs dagegen war nicht der Motor, sondern der Energiespeicher.

Das Problem besteht bis heute fort: Während mit einem Auto mit Verbrennungsmotor mit einem Tankvolumen von beispielsweise 50 Litern und einer Masse von – mit Tankmaterial – weniger als 50 kg mehr als 700 km zurückgelegt werden können, benötigt man bei einem Elektroauto mehrere hundert Kilogramm Batteriegewicht, um über 100 km Fahrstrecke zurücklegen zu können.

Ein praktisches Beispiel: Ein Kompaktauto fährt konstant 100 km/h und benötigt dazu eine Motorleistung von rund 25 kW (35 PS)⁴. Der spezifische Verbrauch eines

⁴ Unterstellt sei ein heute Modell mit 1.000 kg Fahrzeugmasse und üblichen Roll- und Luftwiderstandswerten.

modernen Dieselmotors beträgt etwa 250 g Kraftstoff je kWh⁵; nach 7 Stunden Fahrt mit 100 km/h ist die Strecke Hamburg – München zurückgelegt und 35 kg bzw. 40 kg Dieselkraftstoff sind verbraucht worden.

Mit einem Kilogramm Kraftstoff kann eine Antriebsarbeit von 4 kWh erzeugt werden, für eine moderne Li-Ion-Batterie werden 200 Wh je kg Masse erreicht, d. h. 0,2 kWh – die Energiedichte ist um den Faktor 20 niedriger⁶. Es wird an diesen Zahlen unmittelbar deutlich, dass ein batterie-elektrisch angetriebenes Auto nicht für die gleichen Nutzungen geeignet ist, welche heutzutage Pkw-Standard sind.

Es wird häufig vergessen, dass es nicht nur um eine Motor-Alternative geht, sondern um ein stimmiges Fahrzeugesamtkonzept. Zu einem Verbrennungsmotor einerseits und einem Elektromotor andererseits gehören sehr unterschiedliche Energieträger und -speicher, ferner sind die vorgelagerten Schritte von der Primärenergie-Quelle bis zur Nutzenergie im Fahrzeug wichtig. Die Eigenschaften des Elektroautos unterscheiden sich so stark, dass ein Wechsel nicht ohne Auswirkungen auf das Alltagsverhalten der Autofahrer bleiben wird.

⁵ Dieser Wert beschreibt einen breiten Bereich des Betriebskennfeldes und schließt im genannten Beispiel die Wirkungsgradverluste durch das Getriebe ein. DI-Pkw-Dieselmotoren erreichen Bestwerte im Verbrauch um 200 g/kWh entspr. 41 % Wirkungsgrad.

⁶ Der Wert 4 kWh/kg betrifft beim Dieselmotor die mechanische Nutzarbeit, während bei der Batterie-Elektromotor-Kombination noch Verluste gemäß dem Entladewirkungsgrad der Batterie und dem Wirkungsgrad des E-Motors abgezogen werden müssten – zusammen mindestens 15 %.

2.2 Alternativen zum Benzin- und Dieselantrieb

Bei dem Abriss zur Klimaproblematik in Kapitel 1 wurde die Notwendigkeit einer erheblichen Reduzierung auch der vom Straßenverkehr verursachten CO₂-Emissionen erläutert. Seit die Dämpfung des Klimawandels zu einem deutschen und europäischen Politikziel erklärt wurde, also seit etwa 1987, sind der Öffentlichkeit verschiedene technische Lösungskonzepte vorgestellt worden. Es sei zunächst erinnert an die Erwartungen an den Biokraftstoff RME (Rapsmethylester), dann an das Erdgas, jeweils verbunden mit erheblichen steuerlichen Anreizen.

Um 1995 begann eine allgemeine Begeisterung für das Konzept Brennstoffzelle – Wasserstoff, die damals vor allem von der damaligen Daimler-Chrysler AG in die Regierungen getragen wurde. Ab 2005 sollte es Serienfahrzeuge geben; heute ist unter Fachleuten aus der „fuel cell“ (Brennstoffzelle) eine „fool cell“ (Narrenzelle) geworden – die großen Ankündigungen sind nicht erfüllt worden. Die Kosten und die technischen Schwierigkeiten sowohl für den Antrieb als auch für die Bereitstellung des Kraftstoffes Wasserstoff (alternativ war Methanol als Kraftstoff für Brennstoffzellen-Autos im Gespräch) waren völlig falsch eingeschätzt worden, obwohl auch hier das Umweltbundesamt vor übertriebenen Hoffnungen gewarnt hatte.

Ab 2002 standen einige Jahre lang die regenerativ erzeugten Kraftstoffe zur Lösung der Klima- und auch Versorgungsprobleme im Vordergrund. Biokraftstoffe bekamen jedoch nicht nur wegen der Thematisierung der Flächenkonkurrenz mit der Lebensmittelproduktion eine sehr schlechte Presse, sondern es war deutlich geworden, dass die Nachfrage der reichen Autoländer nur mit Importen aus Entwicklungs-ländern in großem Umfang befriedigt werden könnte. Berücksichtigt man die dort stattfindende Zerstörung der Regenwälder, kann von einem nachhaltigen Klimaschutz durch Biokraftstoffe nicht die Rede sein – im Gegenteil.

Seit 2005 wird von der Politik (nahezu einhellig) und von der Autoindustrie (zumindest von den Verbänden und den PR-Abteilungen) die Zukunft im Batterieauto gesehen. Die Allianz der Befürworter dieser Zukunft ist noch erheblich breiter als bei den früheren Ideen; als industrielles Schwergewicht ist die Stromwirtschaft hinzu gekommen. Mit dem durchweg positiv besetzten Begriff „Mobilität“ verbunden, gibt es

kaum gesellschaftliche Bedenken gegen das zur „Elektromobilität“ geadelte, mit Strom aus dem Netz zu „betankende“ Batterieauto.

Dass Straßenbahnen und Züge schon seit langer Zeit „Elektromobilität“ verkörpern, ist in der öffentlichen Wahrnehmung untergegangen, ebenso die Tatsache, dass es sich bei Batterieautos um eine sehr alte Kfz-Technologie und hinsichtlich der Energieversorgung um herkömmliche Infrastrukturen handelt. Welche technischen Eigenschaften und welche Umstände sprechen nun für den batterie-elektrischen Betrieb von Pkw?

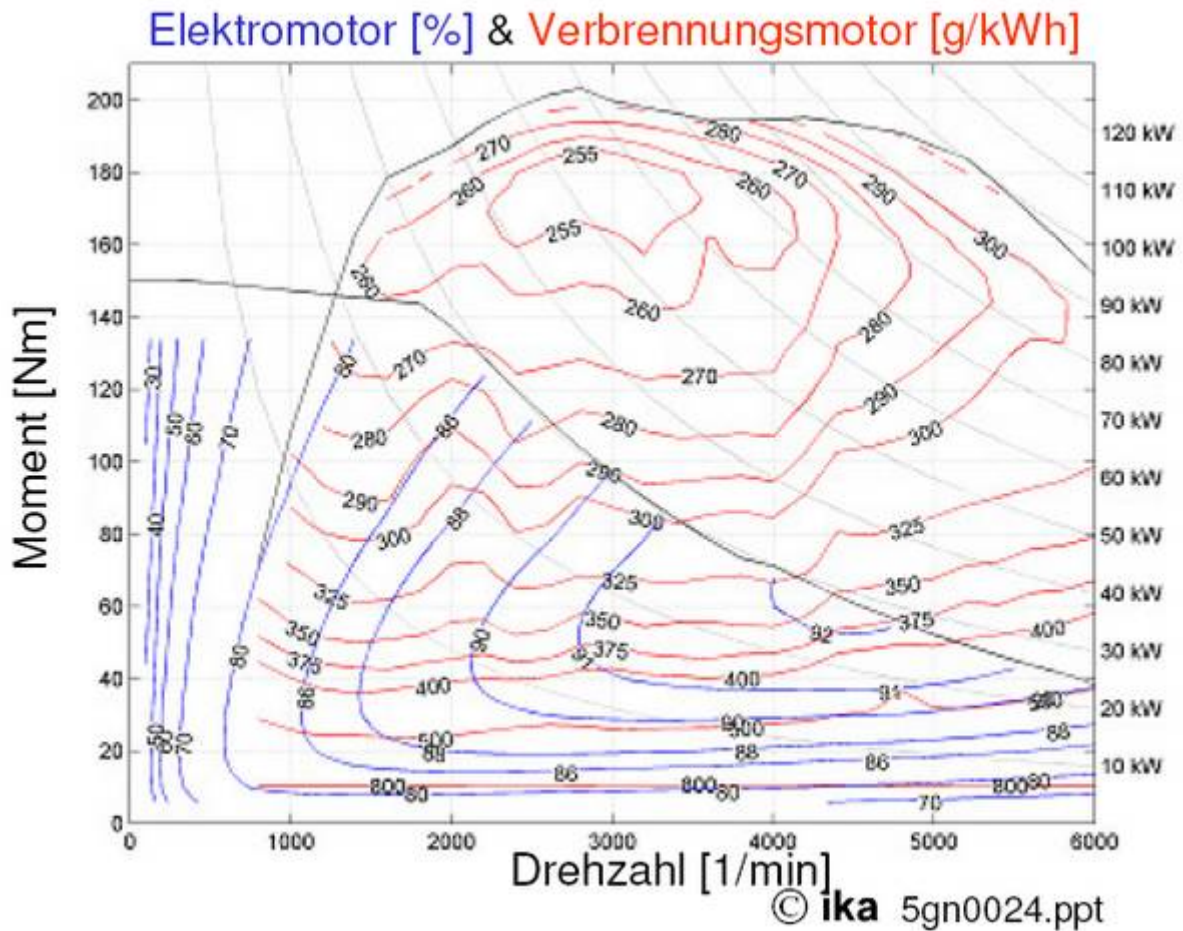
2.3 Besondere Merkmale der Konzeptes Batterie/Elektromotor

Ersetzt man Otto- oder Dieselantriebe durch Elektromotoren, gibt es eine Reihe von technischen und auch ökologischen Vorteilen:

Elektromotoren⁷ können über weitaus größere Last- und Drehzahlbereiche hinweg arbeiten, ohne dass Kupplungen und Getriebe notwendig würden.

- Wenn kein Antrieb notwendig ist, steht der Motor einfach still und verbraucht keine Energie.
- Die Leistungsabgabe beginnt dann weich und sehr leise.
- Es gibt keinen *direkten* Ausstoß von Schadstoffemissionen vor Ort, die Emissionen finden im Kraftwerk statt.
- Der Wirkungsgrad der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie ist über einen sehr großen Drehzahl-Last-Bereich hinweg hoch.

⁷ Auf die verschiedenen technischen Varianten (Synchron-, Asynchron-, etc.) soll hier nicht eingegangen werden.



**Bild 10: Betriebskennfelder eines Verbrennungsmotors und eines Elektromotors
(Quelle: Wallentowitz ika RMTH Aachen 2008)**

Elektromotoren haben gegenüber Verbrennungsmotoren⁸ also erhebliche Vorteile; aus diesem Grunde werden für stationären Einsatz – von der Bohrmaschine in einer Fabrik bis zum Staubsauger – die notwendigen mechanischen Bewegungen auch nicht mit Verbrennungsmotoren erzeugt. Allerdings braucht es, das klingt trivial aber trifft den Kern der Probleme des Elektromotors, eine mit Strom versorgte Steckdose. Für den mobilen Einsatz werden seit mehr als 100 Jahren an blanken Leitungen gleitende Stromabnehmer verwendet (E-Loks, Straßenbahnen, O-Busse).

⁸ Es gibt viele Arten von Verbrennungsmotoren; die in Pkw und Lkw ausschließlich eingesetzten Otto- und Dieselmotoren werden als Hubkolbenmotoren mit innerer zyklischer Verbrennung eingeordnet. Weitere Bau- und Betriebsarten sind z. B. Wankelmotoren (mit Dreh- statt Hubkolben), Gasturbinen (mit kontinuierlicher innerer Verbrennung), Stirlingmotoren (mit kontinuierlicher äußerer Verbrennung) etc. Als Kfz-Antriebe konnten sich die anderen Formen nicht durchsetzen.

Wenn keine kontinuierliche Stromzuführung möglich ist, sind Elektromotoren von Stromspeichern abhängig. Entweder nimmt man Batterien (einmalige Nutzung, nicht aufladbar) oder Akkumulatoren (wiederverwendbar durch Aufladung)⁹. Bei dem Elektroauto sowie den vergleichbaren Anwendungen (vom Laptop bis zum Akku-Schrauber) kommen Akkumulatoren zum Einsatz, auch wenn umgangssprachlich stets von Batterien die Rede ist. Dass die Kapazität auch moderner „Batterien“ und damit die Nutzung der Elektromotoren nach Dauer und Leistungsaufnahme begrenzt ist, hat wohl jeder Mensch in unpassenden Momenten schon feststellen müssen.

Auf die aktuellen Entwicklungen in der Stromspeicherung – die hier der Einfachheit halber als Batterien bezeichnet werden – soll in einem späteren Absatz eingegangen werden. Festgehalten sei hier, dass gemäß den Fachveröffentlichungen die Lithium-Ionen-Technologie (Li-Ion) (nach vorher den Nickel-Metallhydrid-Zellen (NiMH)¹⁰) die besten Aussichten hat, der Energiespeicher der Wahl für elektrische Pkw-Antriebe ist.

Unabhängig von dem Batterie-Typ gilt, dass die verfügbare Antriebsenergie nicht unabhängig von der Umgebungstemperatur ist. Im Winter führt dies zu Problemen, zumal der heute erreichte Pkw-Komfort selbstverständlich auch eine Heizung einschließt. In heutigen Pkw ist eine Vielzahl von elektrisch betriebenen Komfortelementen wie Fensterheber, Scheibenheizung verfügbar, deren Energieverbrauch für die Verbrennungsmotoren mit leistungsstarkem Generator („Lichtmaschine“) keine Rolle¹¹ spielt. Wenn kein Verbrennungsmotor vorhanden ist, wie beim „reinen“ Elektroauto, werden die Zusatzfunktionen sehr sorgfältig optimiert und ggf. auch entfallen müssen, um die Fahrfunktionen – Beschleunigung, Geschwindigkeit und Reichweite – nicht zu gefährden.

Zu den Vorteilen des elektrischen Antriebsmotors gehört, dass Bremsenergie dadurch zurückgewonnen werden kann, dass das Aggregat als Generator verwendet wird und der erzeugte Strom in die Fahrbatterie geschickt wird; dort steht sie dann für den Antrieb zur Verfügung und verlängert den Energievorrat. In welchem Umfang

⁹ Siehe VDE-Normen Reihe 509 und 510 sowie entsprechende DIN-Normen.

¹⁰ NI-MH gibt es übrigens sowohl als Batterien (nicht aufladbar) als auch als Akkumulatoren (aufladbar).

¹¹ Zwar erhöhen diese Komfortelemente den Kraftstoffverbrauch, sie bleiben bei dem gesetzlichen Verbrauchs- und Emissionstest jedoch ausgeschaltet.

Bremsenergie zurück gewonnen werden kann, hängt von einer Reihe von technischen Fahrzeugparametern und Fahrsituationen ab.

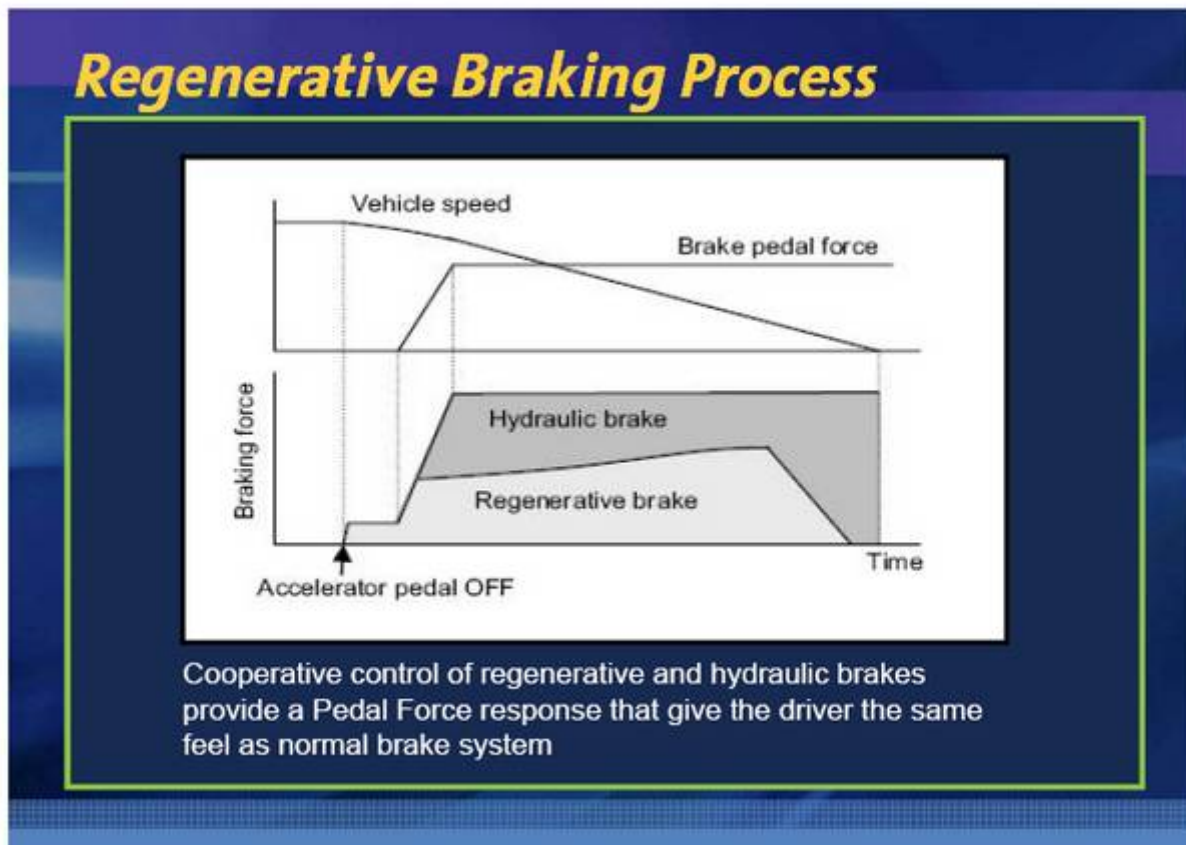


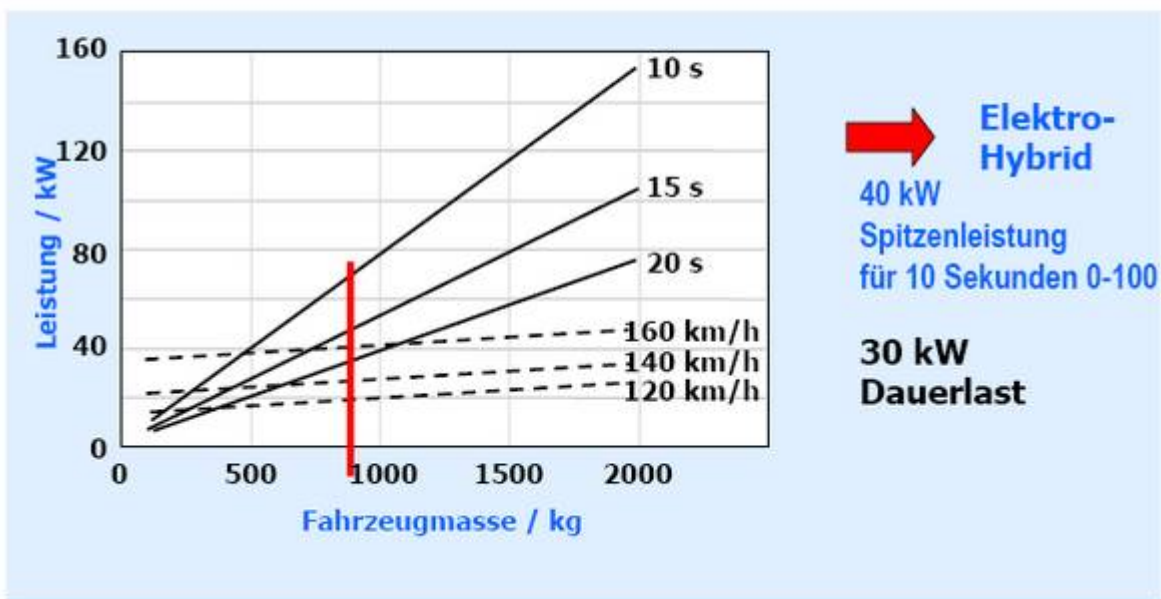
Bild 11: Rekuperation eines Anteils der Bremsenergie (Quelle: Walraven GM 2008)

Grundsätzlich gilt, dass der Europäische Fahrzyklus (NEFZ) mit seinem hohen Innenstadt-Anteil und niedriger Bewegungsdynamik – d. h. niedrigem Beschleunigungs- und Verzögerungswerten günstige Bedingungen für die Rückgewinnung von Bremsenergie bietet, weil für das sanfte Bremsen weniger Leistung von der traditionellen Bremse „vernichtet“ werden muss, als wenn man heftig auf die Bremse tritt. Je höher die vom Generator aufgenommene Bremsleistung ist, desto mehr kann theoretisch wieder in die Batterie zurückgegeben werden. Der Wiedergewinnung der gesamten Bremsenergie stehen zwei Faktoren entgegen: Zunächst wird es technisch nicht möglich sein, die bei starken Bremsvorgängen von der verzögernden Fahrzeugmasse kurzfristig abgegebene

Energie in Strom umzuwandeln und diese dann in die Batterie zu speisen, weil dies zu unzulässig hohen Ladespitzen führen würde. Diese Bremsspitzen müssen dann wie bisher durch Reibung in Umgebungswärme umgewandelt werden. Des Weiteren gilt für die Energiekette Generator – Ladegerät – Batterie und zurück Batterie – Antriebsmotor, dass auf jeder Stufe dieser Kaskade Energieverluste auftreten. Bei Energie aus der Strombremsung wird man davon ausgehen können, dass etwa 50 bis 60 % zurück in den Antrieb fließen können, d. h. 40 bis 50% gehen weiterhin verloren.

Die Motoren aller heute im Verkehr befindlichen Fahrzeuge sind für die Fahrt im NEFZ überdimensioniert. Ein Mittelklassefahrzeug muss –siehe folgende Grafik - kurzzeitig etwa 40 kW Leistung aufbringen, bei gleichmäßiger Fahrt erheblich weniger.

Wieviel Leistung brauchen wir wann?



KKL, September 2008 / PD05

Bild 12: Energiebedarf eines Pkw für Konstantfahrt und Beschleunigung (Quelle: Dietrich CCEM-PSI 2008)

In den vergangenen Jahrzehnten ist es üblich geworden, dass Fahrzeuge der unteren Mittelklasse über weit höhere Antriebsleistungen und Beschleunigungszeiten von 0 auf 100 km/h unter 12 Sekunden verfügen. Ferner sind Autos der Golfklasse selten leichter als 1200 kg. Beides erfordert dann Motorleistungen von rund 90 kW. Diese Fahrzeugleistungen werden auf Autobahnen bei sogenannten „sportlichen“ Fahrern nicht selten auch genutzt.

Elektromotoren können hohe Leistungen abgeben, die Nennleistung kann kurzfristig auch deutlich überschritten werden. Insofern sind kräftige Beschleunigungen mit dieser Antriebsart kein Problem. Das Problem liegt in der geringen Speicherkapazität der Batterie: Ein einfache Überschlagsrechnung zeigt, dass ein Mittelklassefahrzeug derart den Energievorrat einer 300-kg Li-Ion-Batterie innerhalb von 15 Minuten aufbrauchen würde. Wenn die Bremsungen so sanft ausgeführt würden, dass alle Bremsenergie mit einem Rekuperations-Wirkungsgrad von 50 % wiedergewonnen würde, würde sich der Aktionsradius bei solchem Fahren auf 25 Fahrminuten erhöhen können. Es wird also deutlich, dass batteriegetriebene Elektroautos nicht für hohe, instationäre Fahrgeschwindigkeiten geeignet sind.

2.4 Verkehrliche Rahmenbedingungen für Elektroautos

Jede Technik hat optimale Nutzungsprofile, jedes Konzept hat seine Stärken und Schwächen. Elektroautos (genauer gesagt: Autos nach dem Konzept „Batteriespeicherung und rein elektrischer Antrieb“) können Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotor nicht umfassend ersetzen.

Wegen der begrenzten Kapazität des Energiespeichers ist ein Elektroauto¹² - und dabei handelt es sich hier um ein Fahrzeug mit einem rein elektrischen Betrieb ohne Verbrennungsmotoren für längere Fahrstrecken - nicht geeignet, die herkömmlichen PKW zu ersetzen. Ein Elektroauto mit Energiespeicher per Batterien wird daher nur einen begrenzten Einsatzbereich abdecken können.

¹² Hybridfahrzeuge, bei denen sowohl Verbrennungs- als auch Elektromotoren zum Einsatz kommen, und die daher Energie sowohl im Tank als auch in Batterien speichern, können das Reichweiten-Dilemma lösen. Doppelte Technik bedeutet allerdings auch (noch) höhere Kosten und größere Massen.

Dies ist den Befürwortern des Elektroautos durchaus bekannt und hat daher zu der Argumentation geführt, dass der größte Teil aller PKW-Fahrten ohnehin nur wenige Kilometer lang ist. Die meisten Wege vom Arbeitsplatz, zum Einkaufen und für weitere private Nutzungen sind so kurz, dass die in der Batterie gespeicherte Energiemenge für einen rein elektrischen Betrieb ausreichen würde. Wenn man diesem Argument folgt, stellt sich das Elektroauto als ein Zusatzfahrzeug dar, neben welchem es für die weiteren Fahrten ein „richtiges“ Auto gibt.

Es stellt sich nun die Frage, ob in fernerer Zukunft ein PKW mit Elektroantrieb in der Gesamtkonzeption die gleichen Merkmale aufweisen kann wie die konventionellen Autos. Dies bezieht sich vor allem auf die für den Kraftstoffverbrauch wichtigen Parameter Fahrzeugmasse, Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsfähigkeit und Motorleistung. Wenn die elektrisch betriebenen Pkw ohnehin nur kurze Fahrstrecken zurücklegen müssen, sind hohe Maximalgeschwindigkeiten von geringerem Nutzen als bei Fahrten über lange Distanzen. Wenn das Elektroauto weiterhin vor allem in städtischen Gebieten zum Einsatz kommt, werden diejenigen Komfortmerkmale wie Fahrzeuggröße unwichtiger.

Diese Überlegungen führen sowohl in Hinsicht auf die Marktchancen als auch auf die ökologischen Folgen der Unterstützung des Elektroautos zu wichtigen Schlussfolgerungen. Zum einen zeigen die Erfahrungen mit den begrenzten Markterfolgen des Smart, dass Kunden nicht unbedingt ein auf ihre speziellen Nutzungsbedürfnisse zugeschnittenes Auto haben möchten, sondern eines, mit welchem sie auch seltenere Mobilitätswünsche erfüllen können. Auch ein Single, welcher zur Arbeit und zur Freizeit mit dem zweisitzigen Fahrzeug hervorragend zurechtkommt, möchte offensichtlich in der Lage sein, mehr Menschen mitzunehmen und größere Strecken zurücklegen zu können. Auf das Batterieauto übertragen bedeutet dies, dass das Argument mit den meist nur sehr kurzen Fahrstrecken, mit welchem die begrenzten Reichweiten des Batterieautos relativiert werden, nur wenige Käufer überzeugen könnte. Selbst wenn sie nur fünfmal im Jahr größere Fahrstrecken zurücklegen, für welche man einen Wagen mit Verbrennungsmotor benötigt, könnten diese fünf Fahrten die Entscheidung gegen das Batterieauto prägen.

Bereits bei der Einführung des Smart ist das durchaus rationale Argument, dass die meisten Fahrten im Auto allein oder höchstens zu zweit zurück gelegt werden, erheblich überschätzt worden. Der Absatz konnte nie die Erwartungen erfüllen und die Produktionszahlen sind auch heute noch nicht wirtschaftlich zufriedenstellend. Es ist nach wie vor in der Regel ein relativ teures Zweit- oder Drittauto; die Absatzzahlen z. B. des Corsa sind mehrfach höher, weil dies Modell kostengünstiger ist und eine Mutter auch einmal drei Kinder transportieren kann. Trotz einer statistische Zahl über den durchschnittlichen Auslastungsgrad von z. B. 1,3 ist es für viele Menschen vernünftig, ein Auto mit 4 bis 5 Sitzen zu kaufen.

Trotz der vielen Kurzstrecken – nach Bild 13 sind etwa 90 % aller Fahrten nur etwa 30 km lang - auf diese sehr kurzen Strecken entfallen 50 % aller Kfz-Kilometer - kann es individuell vernünftig sein, ein auf lange Strecken ausgelegtes Auto zu kaufen.

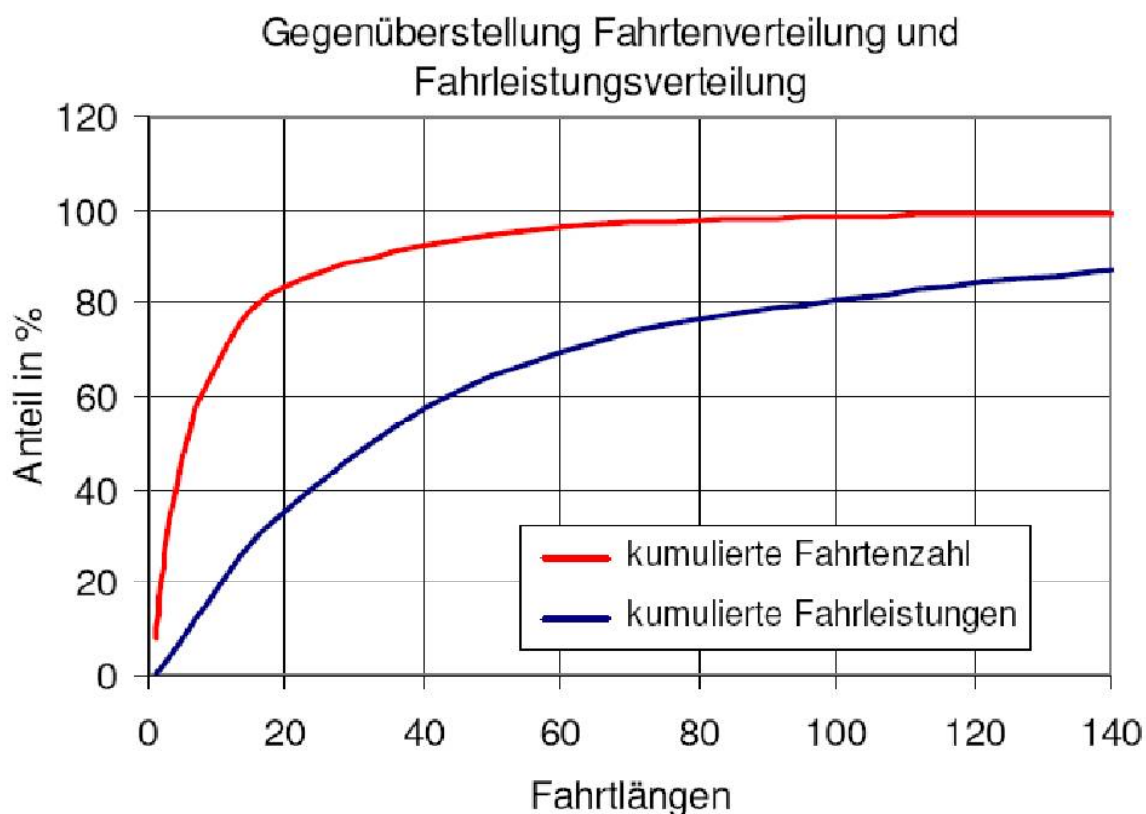


Bild 13: Anteile der Fahrten und der gefahrenen Kilometer an der durchschnittlichen täglichen Mobilität. Beispiel Österreich. (Quelle: Leitinger TU Wien 2008)

In ökologischer Hinsicht ist zu prüfen, welche Anteile am gesamten Energieverbrauch des PKW-Segmentes mit den Batterieautos auf den kurzen Strecken substituiert werden können. Es ist zu prüfen, ob mit dem Elektroauto überhaupt nennenswerte Einsparungen an CO₂ erreicht werden können. Dieser Aspekt wird in zwei Richtungen zu vertiefen sein: Zum einen geht es um die Zahl der Kfz-km, die statt von Pkw mit Verbrennungsmotoren durch solche mit Elektromotoren mit Batterien und deren Aufladung aus dem Netz zurückgelegt werden. Zum anderen geht es um die spezifischen Emissionen der Stromerzeugung, ergänzt um die anteiligen Verluste in der Energiekette bis zum Antrieb.

Alle bisherigen Aussagen zu den Kosten des Elektroautos, insbesondere zu den Batteriekosten, führen zu der Schlussfolgerung, dass ohne staatliche Subventionen diese Antriebstechnik keine Marktrelevanz erreichen wird. Die Art der Subventionen, von denen einige Kalkulationen über die künftigen Fahrtkosten pro Strecke ausgehen, betrifft vor allem die Befreiung von der Mineralölsteuer. Nun wird die Höhe der Mineralölsteuer sowohl politisch als auch in den volkswirtschaftlichen Berechnungen immer in Zusammenhang mit den Wegekosten betrachtet. (Noch selten werden die ökologischen Kosten des Autoverkehrs bei diesen Betrachtungen einbezogen.)

Es ist offensichtlich, dass auch für elektrisch angetriebene PKW Straßen gebaut und unterhalten werden müssen. Daher wird es im Interesse einer Kostengerechtigkeit nicht vertretbar sein, dass die Zuführung der Antriebsenergie aus dem Netz ohne anteilige Besteuerung analog der Mineralölsteuer erfolgt. Eine Antwort dazu könnte die Einführung einer allgemeinen Pkw-Maut sein.

Ein weiterer Aspekt, der oft übersehen wird, ist, welche Konkurrenz das Elektroauto zum ÖPNV darstellt, da die Nutzungen nach den Vorstellungen der Befürwortern vor allem im Stadtverkehr gesehen werden.

3. Beitrag von Elektroautos zum Klimaschutz

3.1 Heutige sowie kurz- bis mittelfristige Situation

In vielen Artikeln und Reden wird als selbstverständlich unterstellt, dass die Einführung von Elektroautos für die Umwelt, insbesondere für den Klimaschutz, Vorteile bringt. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren stoßen Elektromotoren tatsächlich keine Schadstoffe aus, daher werden sie häufig als Null- Emissions-Fahrzeuge bezeichnet.

Ehrlich wäre es allerdings, sie „Anderswo-Emissions-Fahrzeuge“ zu nennen. Dabei wird in der Regel nicht gesehen, dass die klassischen Schadstoffe Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide bei modernen Benzinfahrzeugen, welche die Schadstoffnormen Euro 4 einhalten, so niedrig sind, dass sie kaum noch gemessen werden können. (Und nach der Umsetzung von Euro 6 wird dieser Aspekt des lokalen Schadstoffausstoßes auch für Diesel-Pkw als Argument für die Einführung des Elektroautos nicht mehr gültig sein)

Entscheidend für den Klimaschutz ist die Gesamtbilanz aller Emissionen in der Produkt- und Nutzungskette, also einschließlich der energetischen und fahrzeugtechnischen Vorleistungen. Sprich man von „Null-Emissionen“ bei der Fahrzeugnutzung, dann gilt dies auch für Elektro-Autos erst dann, wenn der gesamte Strom im Netz emissionsfrei erzeugt wird.

Bisher ist der Anteil des regenerativ erzeugten Stroms noch sehr gering, je nach Betrachtung (z. B. Netto- oder Brutto-Stromerzeugung, mit oder ohne Import und Export von Strom) betragen die regenerativen Anteile etwa 15 bis 18 % (siehe dazu auch Tabelle 1 weiter unten im Text). Die Anteile des Windstroms und anderer nicht-fossiler Energiearten werden mit großer Sicherheit sehr stark zunehmen, allerdings müssen bei heutigen Diskussionen über das „umweltfreundliche“ Elektroauto und bei den Planungen zukünftiger Fördermaßnahmen die heutigen Gegebenheiten und die zeitlichen Fristen beachtet werden. Erfolgt dies nicht, sondern gibt man sich oberflächlichen Vorstellungen von Null-Emissionen hin, schadet dies der Klimabilanz und bindet Mittel für effizientere Optionen.

Bevor darauf näher eingegangen wird, vorab eine Überschlagsrechnung¹³:

Wie bisher gezeigt, benötigt ein Elektroauto, das eine ähnliche Größe und ausreichende Fahrleistungen im Testzyklus wie ein konventionelles Benzin- oder Dieselfahrzeug aufweist (also etwa: VW Golf), zwischen 20 und 25 kWh pro 100 km.

Der heutige CO₂-Ausstoß pro kWh des deutschen Strommixes beträgt ca. 600 g. Dies bedeutet einen CO₂-Ausstoß von 120 bis 150 g/km. Formal fordert die EU-Gesetzgebung, dass bis 2015 die neu zugelassenen Pkw im Durchschnitt nicht mehr als 130 g CO₂ je km (im Testzyklus gemessen) ausstoßen; mit den zahlreichen abschwächenden Regelungen werden es eher 140 g/km sein. Um dieses Ziel zu erreichen, werden für die schweren, viel emittierenden Oberklasse-Fahrzeuge und SUV zahlreiche kleine und kompakte, sparsame Pkw verkauft werden müssen. Derartige Modelle werden erfreulicherweise auf dem Markt angeboten mit CO₂-Werten unter 120, ja sogar unter 100 g/km. Dies ist gerade der Marktbereich, der auch für Elektroautos angestrebt wird.

Eindeutig ist, dass durch die Einführung von Elektroautos auf der Basis des heutigen Strommixes kein Fortschritt bei der Reduzierung der Klimagasemissionen zu erzielen ist. (Anm.: Bei dieser Überschlagsrechnung sind noch die Vorketten zu berücksichtigen, d. h. für E-Autos kommen noch die Ladungs- und Selbstentladungsverluste hinzu, für Verbrennungsmotoren die Emissionen der Förderung, Transport und Verarbeitung des Rohöles.)

Nun wird häufig nicht berücksichtigt, dass sich Elektroautos aufgrund der Reichweiten- und Zuladungsbeschränkung für die meisten Menschen nicht als Erstfahrzeuge eignen. Eine Förderung von derartigen Fahrzeugen wird also bedeuten, dass sich die Zahl der Zweit- und Drittfahrzeuge im Bestand erhöhen wird. Dies hat eine Reihe von unerfreulichen ökologischen Konsequenzen:

- Wenn der Einsatz von Elektroautos zu einer Vergrößerung der Fahrzeugmenge führt, ist es für eine umfassende Technik- und Politikfolgenanalyse notwendig, die Herstellungsprozesse zu berücksichtigen und Lebenswegbilanzen für die zusätzlichen Fahrzeuge zu erstellen. Die

¹³ Der Ehrlichkeit halber sei darauf hingewiesen werden, dass alle Szenarien zur zukünftigen Stromerzeugung Überschlagsrechnungen sind.

Klimagasemissionen zur Herstellung von Elektroautos einschließlich Batterien sind höher als bei konventionellen Fahrzeugen. Diese sind rechnerisch auf deutlich weniger Kilometer pro Jahr verteilt. Im Ergebnis kann dies dazu führen, dass selbst bei erheblich höheren Anteilen regenerativ erzeugten Stroms die Gesamtbilanz für das Klima negativ ausfällt.

- Nach den Vorstellungen vieler E-Auto-Unterstützer sollen die Kommunen das Käuferinteresse dadurch steigern, dass der Zugang zu den Innenstädten für elektrische Traktion bevorzugt bzw. für Pkw mit Verbrennungsmotoren verteuert oder anders benachteiligt wird. Als Beispiel wird auf die City-Maut London verwiesen. Für einen typischen Vorort-Haushalt wird das große Familienfahrzeug damit frei und wird z. B. zum Einkauf bewegt. Die sozialen Folgen sind im Einzelnen unklar, sie werden die Klimabilanz beeinflussen – wahrscheinlich negativ.

Zwischenfazit zum Thema Klimaschutz:

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass nur der Einsatz von CO₂ frei erzeugtem Strom die Bilanz eines Elektroautos deutlich verbessern kann. Ökologisch und ökonomisch widersinnig wäre es nun, erneuerbaren Strom zum Laden von E-Autos zu verwenden und die Nutzung dieses Öko-Stroms in anderen Sektoren zu verringern, obwohl dort die CO₂-Reduzierung je bereit gestellter kWh höher und insgesamt kostengünstiger erreichbar wäre.

Die Möglichkeiten des Elektroautos, einen Beitrag zur Reduktion der Klimagasemissionen des Straßenverkehrs zu leisten, sind sehr begrenzt. Weshalb wird dennoch das Elektroauto derart euphorisch von der Bundesregierung und der Industrie hochgejubelt? Das wird ein Schwerpunkt der Analyse zu den Motivationen der Beteiligten sein. Zuvor sollte jedoch den dortigen Vorstellungen eine Betrachtung der Kosten gegenübergestellt werden.

3.2 Kosten des Elektro- Autos und Konsequenzen für den Klimaschutz

Es werden immer wieder Zahlen in Szenarien genannt, dass Elektroautos nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch attraktiv sein können.

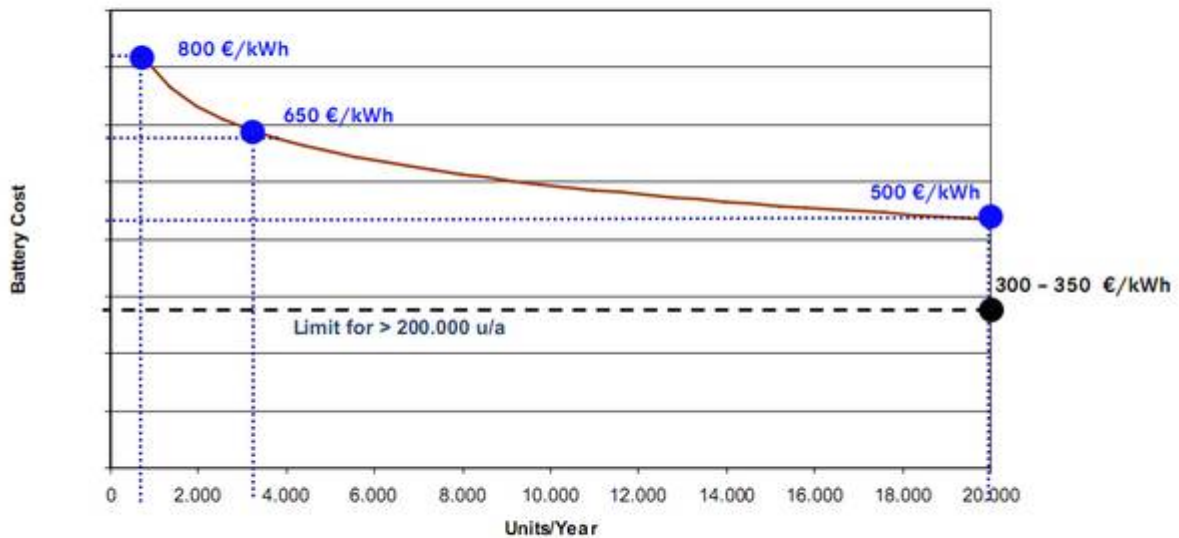
Die Basisdaten, die heute vorliegen, lassen solche Vorhersagen als sehr unrealistisch erscheinen. Zurzeit liegen die Batteriekosten pro kWh Kapazität bei ca. 1000 €. Es werden immer Lernkurven von anderen neuen Technologien benutzt, um sehr günstige Batteriekosten vorher zusagen. Unter Lernkurven versteht man die Kostenminderung einer Technologie über die Zeit durch verbesserte Technologie und durch Massenfertigung. (Siehe als Beispiel die Kurve im Bild 14)

Die Kosten für die Batterie umfassen nicht nur die Kosten für die Batteriezelle, sondern auch die Kosten für den Batteriesatz einschließlich Leistungselektronik sowie Heizung und Kühlung. Bei der Leistungselektronik, die zur Regelung des Elektromotors notwendig ist, sind noch große Kostenreduktionspotentiale vorhanden, bei den anderen Komponenten sind diese jedoch viel geringer. Bei sehr optimistischer Schätzung liegen die Kosten im Jahre 2020 bei 400 € pro kWh. Um dieses Kostenziel zu erreichen, müssen die Kosten für die Batteriezelle unter 250 € pro kWh liegen.

Da die Lebensdauer einer Lithiumbatterie von den Ladungszyklen und von der Entladungstiefe abhängt, werden die Batterien zurzeit nur bis auf 70 % der Kapazität entladen, um eine Lebensdauer von 10 Jahren zu erreichen. Je höher die Entladungstiefe, desto geringer ist die Lebensdauer einer Batterie. Es bestehen Forschungsziele bei einer 50%igen Entladungstiefe eine 10 jährige Lebensdauer zu erreichen, d. h., es kann nur die Hälfte der eingebauten Batteriekapazität genutzt werden.

Dies bedeutet aber, dass für eine Reichweite von 100 km eine Batteriekapazität von 50 kWh in das Fahrzeug eingebaut werden muss, wenn der Verbrauch 25 kWh beträgt. Bei Kosten von 400 € pro kWh bedeutet dieses für eine Reichweite von 100 km Batteriekosten von 20.000 €.

Battery (System) Cost for Electric Vehicle at 20.000 units/a



Dr. Christian Mohrdieck, 090610

Bild 14: Beispiel für eine Kostenlernkurve Batterien (Quelle: Moordieck, Daimler AG)

Was bedeuten diese Fahrzeugkosten für die politischen Vorstellungen zur sog. „Elektromobilität“? Sollte man die Kostenaspekte nicht getrost den Herstellern und ggf. den Autokunden überlassen?

Allen an der E-Auto-Diskussion beteiligten Akteuren ist bekannt, dass kaum jemand ein Elektroauto kaufen wird; das Konzept wird am Markt nicht angenommen werden. Es gilt als selbstverständlich, dass der Staat öffentliche Haushaltsmittel ausgeben wird, um das Elektroauto im Markt durchzusetzen, und dass auch zusätzlich die steuerlichen Bedingungen so gestaltet werden, dass für den Kunden die Nutzung wirtschaftliche Vorteile bringt.

Aus umweltökonomischer Sicht stellt sich damit die Frage, ob dieser Mitteleinsatz effizient ist. Es bleibt ja nicht bei den Kosten der Fahrzeug-Anschaffung und den Kraftstoff-(Energie-)Kosten; zu Letzteren wird selbstverständlich angenommen, dass

keine den Mineralölsteuern analoge Steuern erhoben werden – als ob für E-Autos keine Straßenkosten anfallen würden. Diese Aspekte werden grundsätzlich ausgeblendet; dass die geringen Energiekosten je gefahrenen Kilometer Folge staatlicher Subventionen sind, die bei größerer Marktdurchdringung gestrichen werden müssen. Dies wird die Nutzerökonomie aber deutlich verschlechtern.

Auch bei den Infrastrukturkosten wird entweder vergessen, dass auf die öffentlichen Haushalte enorme Investitionen zukommen, oder dies wird verdrängt. Häufig wird irrtümlich angenommen, dass die vorhandene Netzstruktur des Stromnetzes ausreicht. Allerdings wohnen ca. 80 % der Großstadtbewohner in Mehrfamilienhäusern und verfügen nicht über eine Garage. Es werden also Ladestationen notwendig; pro Fahrzeug ergeben sich dann zusätzliche Investitionskosten von 4000- 6000 €.

Wer trägt diese Kosten? Muss man sich vorstellen, dass zu jedem Parkplatz eine Säule aufgebaut wird, die von jedem benutzt werden kann? Und dies im öffentlichen Straßenraum. Im Unterschied zu den Tankstellen wird ein Fahrzeug nicht nur alle 2 oder mehr Wochen für 5 Minuten eine Säule blockieren, sondern täglich für Stunden. Selbst wenn sich technisch-planerische Lösungskonzepte finden werden: Elektroautos sind und bleiben teuer – für den einzelnen Kunden und für die Allgemeinheit.

Es muss deshalb die Frage gestellt werden, wie hoch die Kosten pro eingesparter Tonne CO₂ im Vergleich zur Reduktion am konventionellen Auto mit Verbrennungsmotor ausfallen. In umfassender Kooperation haben maßgebliche deutsche Forschungsinstitute die Minderungskosten für verschiedene klimagas-mindernde Maßnahmen im Verkehrsbereich ermittelt, siehe Bild 15.

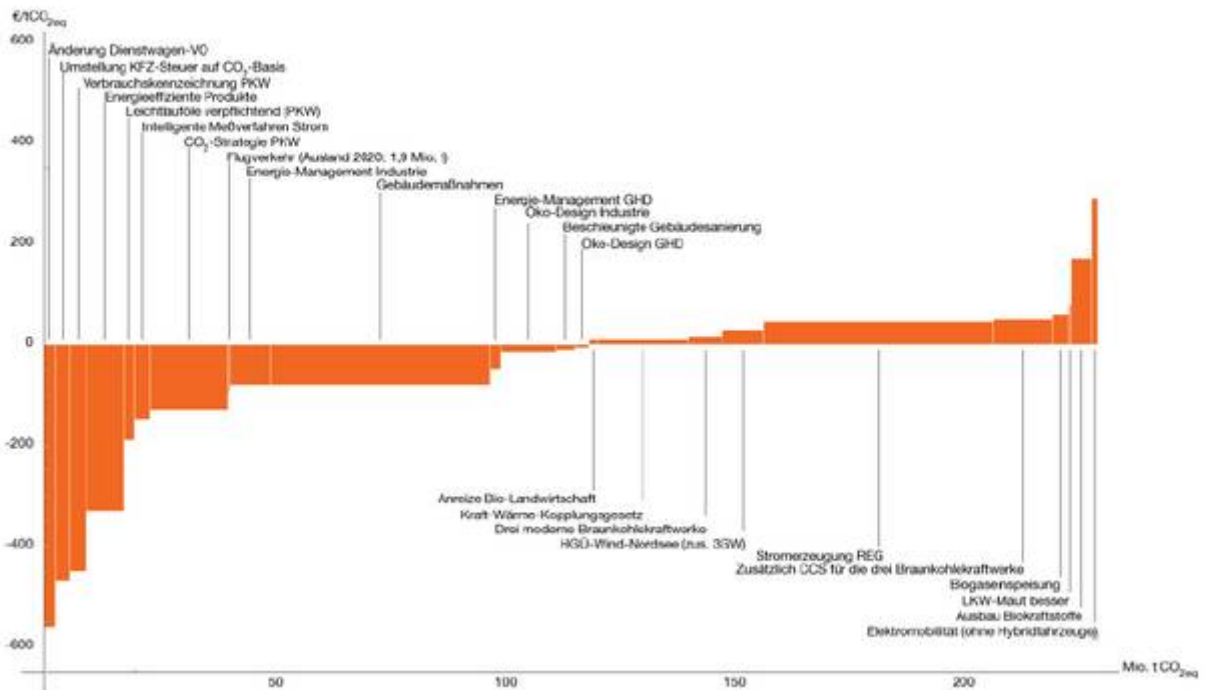


Bild 15: CO₂ Minderungskosten einzelner Maßnahmen (Quelle Jochem et al. PIK 2008)

Ohne hier auf die Maßnahmen im Einzelnen einzugehen, sei festgehalten: Der batterieelektrische Antrieb von Kraftfahrzeugen ist einer der teuersten Wege, um CO₂-Emissionen zu senken.

4. Motivationen der Beteiligten

4.1 Politik

Die Politik ist unter großem Rechtfertigungszwang. Die deutsche Regierung sowie die EU haben weitreichende Zusagen zur Minderung der Klimagasemissionen Deutschlands und der europäischen Gemeinschaft gemacht. Die EU hat sich im Kyoto-Protokoll verpflichtet, ihre Emissionen während der Jahre 2008 bis 2012 um acht Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 zu verringern. Um diese Zielsetzung zu erreichen, haben sich die EU-Mitgliedstaaten zu nationalen Klimaschutzziele verpflichtet. Deutschland hat zugesagt, die Treibhausgasemissionen im gleichen

Zeitraum um 21 Prozent (bezogen auf 1990) zu reduzieren. Unter diese Regelung fallen die Emissionen von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Di-Stickstoffoxid (N₂O) (Bezugsjahr 1990) sowie von teilhalogenierten Kohlenwasserstoffen (H-FKW), perfluorierten Kohlenwasserstoffen (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆).

Während der Vorbereitungen für die UN-Klimakonferenz in Kopenhagen im Dezember 2009 haben sich die EU-Mitgliedsstaaten geeinigt, ihre Treibhausgasemissionen bis 2020, bezogen auf 1990, um 20 % zu verringern. Falls andere wichtige Staaten bedeutende Minderungsverpflichtungen eingehen, hat die EU sogar eine Reduktion um 30 % in Aussicht gestellt. Die deutsche Bundesregierung hat in Meseberg 2008 ein Reduktionsziel von 40 % beschlossen. Die meisten Sektoren haben in der Vergangenheit ihre Klimagasemissionen verringert. Der Verkehrssektor hat in der EU seine Emissionen jedoch deutlich erhöht. In Deutschland wird zwar eine Reduktion verzeichnet, die jedoch weitaus geringer als die der anderen Sektoren ist.

Es gab deshalb in der Vergangenheit politische Ansätze, die Klimagasemissionen des Straßenverkehrs in der EU zu verringern. Ein wichtiger Pfeiler der politischen Bemühungen ist die Verbesserung der technischen Effizienz der Fahrzeuge. Während bei den schweren Nutzfahrzeugen politisch die These vertreten wurde, die hohen Kraftstoffpreise würden bei diesen Fahrzeugen ausreichend Druck zur Verbesserung der Kraftstoffverbräuche, und damit des CO₂-Ausstoßes, bewirken, hat der EU-Ministerrat – auf Vorschlag der damaligen Bundesumweltministerin Angela Merkel - 1995 einen Grenzwert von 120 g/km für spätestens 2012 für den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß aller in der EU verkauften Pkw beschlossen. Die Autoindustrie hatte dagegen erfolgreich auf allen Ebenen der Politik Lobbyarbeit betrieben und 1998 erreicht, dass die EU eine Selbstverpflichtung der europäischen Autohersteller akzeptierte, den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß ihrer Neuwagen auf 140 g/km im Jahr 2008 zu senken. Im Gegenzug verzichtete die EU auf gesetzliche Maßnahmen. In den folgenden zehn Jahren machte die Autoindustrie keine bzw. nur sehr geringe Anstalten, diese Selbstverpflichtung zu erfüllen. Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen sanken nur wenig und lagen 2007 immer noch bei mehr als 160 g/km. In Deutschland verkaufte Pkw deutscher Hersteller lagen sogar bei mehr als 170 g/km.

Als Konsequenz aus diesem Scheitern legte EU-Umweltkommissar Stavros Dimas im Dezember 1995 den Vorschlag der EU-Kommission zur Einführung eines CO₂-Grenzwertes von 120 g/km ab 2012 vor. Nach langen, schwierigen Verhandlungen, in denen sich die deutsche Bundeskanzlerin Merkel vehement gegen zu strenge Grenzwerte vor allem für große Fahrzeuge eingesetzt hat, wurde die 100%ige Einführung des Grenzwertes von 120 g/km auf 2015 verschoben.

In dem politisch attraktiv erscheinenden Grenzwert stecken jedoch weitere Abschwächungen. So sollen 10 g/km durch den Einsatz von Biokraftstoff und Leichtlaufreifen sowie Schaltanzeigen erreicht werden. Da die Biokraftstoffe nicht von der Automobilindustrie in den Markt gebracht werden und auch eine Reihe von negativen Umweltauswirkungen aufweisen und Leichtlaufreifen sowieso zur Einhaltung der CO₂-Minderungsverpflichtung eingesetzt werden, ist dies eine Abschwächung des ursprünglichen Grenzwertes um 10 g/km. In welcher Form Schaltanzeigen hier in Anrechnung gebracht werden können, ist immer noch unklar, da dafür von der Autoindustrie keine eindeutigen Fakten über die dadurch erzielten Reduktionen vorgelegt wurden. Hinzu kommen noch weitere 7 g/km, die für sogenannte Ökoinnovationen angerechnet werden können, wodurch der tatsächliche Grenzwert auf 137 g/km im Jahre 2015 steigt.

Diese moderate vorgeschriebene Senkung des CO₂-Ausstoßes wird voraussichtlich gerade ausreichen, um das Wachstum der Fahrzeugflotte auszugleichen. Die prognostizierten Steigerungen des Lkw-Verkehrs werden dafür sorgen, dass die CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in Europa jedoch weiter wachsen werden.

Deshalb greift die Politik nach jedem Strohhalm, der eine Reduktion der Klimagasemissionen des Straßenverkehrs verspricht. In der EU Richtlinie zur Begrenzung der CO₂-Emissionen von PKW ist auch ein Passus enthalten, der für umweltfreundliche Neuentwicklungen einen CO₂-Bonus vorsieht.

Danach werden folgende Pkw belohnt: Autos, die weniger als 50 Gramm CO₂ pro Kilometer emittieren, sollen bei der Berechnung des Flottendurchschnitts für den Hersteller in den Jahren 2012 und 2013 dreieinhalbfach, 2014 zweieinhalbfach und 2015 anderthalbfach angerechnet werden. Der Automobilhersteller kann in seiner CO₂-Bilanz für ein Elektroauto den Emissionswert 0 ansetzen, unabhängig davon mit welchem Strom das Fahrzeug geladen wird. Für Strom aus erneuerbaren Quellen,

der von Elektroautos verwendet wird, wird das 2,5-fache der Einspeisung auf die Quote für erneuerbare Energien von 10% im Verkehrssektor angerechnet. Wird der erneuerbare Strom aber für Bahnen benutzt, zählt er nur einfach!

Das Problem dabei ist, dass durch diese Bonusfaktoren die CO₂-Emissionen der konventionellen Fahrzeuge höher werden, falls eine nennenswerte Menge an Elektrofahrzeugen zugelassen würde. Erschwerend kommt dazu, dass Elektrofahrzeuge aufgrund ihrer eingeschränkten Reichweite eine deutlich geringere Jahresfahrleistung aufweisen als z.B. Diesel-Pkw. Dadurch wird die Gesamtkohlendioxidreduktion noch weiter verringert.

4.2 Autoindustrie

Mit der Entwicklung von neuen Fahrzeugkonzepten, wie es das Elektrofahrzeug darstellt, ist ein hoher finanzieller und personeller Aufwand verbunden. Deshalb verwundert es auf den ersten Blick, dass die europäische Autoindustrie, und hier besonders auch die deutschen Hersteller, auf die Erwartungen der Politik so positiv reagierten. In den nächsten 15 bis 20 Jahren wird das Elektroauto nach allen Prognosen nur eine untergeordnete Rolle bei den Fahrzeugverkäufen spielen. Nach der sehr ambitionierten Vorstellung der Bundesregierung „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität“, der im August 2009 verabschiedet wurde, sollen im Jahre 2020 eine Million Elektroautos in Deutschland fahren. Zurzeit sind etwas mehr als 41 Millionen Pkw in Deutschland zugelassen. Das heißt, dass die deutsche Autoindustrie auch im Jahre 2020 ihr Hauptgeschäft mit konventionellen Fahrzeugen bestreiten wird.

Autos verkaufen sich zum großen Teil nicht nur über ihren Nutzwert, sondern auch darüber, welches Image der Autokäufer und seine Umwelt mit dem Fahrzeug verbinden. Für die Fahrzeughersteller geht es also darum, die gesellschaftlichen Entwicklungen imagemäßig nachzuvollziehen. Wenn in der Gesellschaft die Frage des Klimawandels immer mehr ins Bewusstsein der Menschen dringt, muss der Fahrzeughersteller Lösungen dafür anbieten. Das heißt nicht, dass diese Fahrzeuge dann auch gekauft werden, da beim Fahrzeugkauf noch viele andere Aspekte mit eingehen, besonders der Preis und der Nutzwert. Bei einer kürzlich durchgeführten

Umfrage des ADAC zur Kaufbereitschaft von Elektroautos bei seinen Mitgliedern stehen fast 90 Prozent dem Elektroauto positiv gegenüber. Aber fast 40 Prozent der Befragten würden für ein Elektroauto nicht mehr Geld ausgeben, als für ein vergleichbares Fahrzeug mit einem herkömmlichen Antrieb. Nur zehn Prozent würden sich mit einer Strecke bis 100 Kilometer zufrieden geben. Jeder Fünfte will immerhin schon 200 Kilometer weit kommen. Die meisten (31,6 Prozent) erwarten 500 Kilometer Fahrt ohne lästige Ladepause.

Das heißt aber, dass die Erwartungen der potenziellen Autokäufer mit den technischen und finanziellen Randbedingungen, die für Elektroautos noch sehr lange gelten, nicht in Einklang zu bringen sind.

Trotzdem kann ein Autohersteller auch mit kleinen Verkaufszahlen innovativer Konzepte sein Image beeinflussen. Das Beispiel Prius von Toyota belegt dies eindrucksvoll. Obwohl sich die CO₂-Emissionswerte der verkauften Fahrzeuge in Deutschland von VW und Toyota 2007 praktisch nicht unterschieden, hat es Toyota geschafft, die relativ geringen Priusverkäufe eindrucksvoll für die Imageverbesserung zu nutzen. In die gleiche Richtung zielen Modelle wie Blue-Motion von VW oder BlueEFFICIENCY von Daimler.

Dies bedeutet also, dass es für die Autohersteller darauf ankommt, als Erste eine kleine Stückzahl von Elektroautos zu verkaufen, damit die Erwartungen der Politik zu erfüllen, aber beim Kunden nicht die Erwartungen zu erwecken, dass Elektroautos in Kürze das konventionelle Fahrzeug ersetzen können.

Die Erwartung der Politik zu erfüllen, ist für die Autohersteller wichtig, weil damit strengere CO₂-Vorschriften mit dem Hinweis auf eine bessere Zukunft verhindert werden können. Dabei spielt auch der Hinweis auf die Innovationsführerschaft und damit auch die Erwartung, weitere steuerliche Erleichterungen zu bekommen, in Verbindung mit der Betonung der hohen Exporterlöse der Autoindustrie eine wichtige Rolle. Das hohe Risiko ist jedoch dabei, beim Kunden unerfüllbare Hoffnungen zu erwecken, die bei einer Enttäuschung in Kaufzurückhaltung umschlagen können. Außerdem kann die Politik solche technischen Versprechen als Basis für Verkaufsquoten nehmen, wie es z.B. in Kalifornien der Fall ist.

4.3 Stromindustrie

Die deutsche Stromwirtschaft hat nach der sogenannten Liberalisierung durch ihre Macht über die Netze in den vergangenen Jahrzehnten noch besser verdient als in den klassischen Monopol-Zeiten. Vier Riesen diktieren den Markt, Wettbewerb findet praktisch nicht statt. Wenn die Preise für die Haushaltskunden und die Gewinne der großen Vier gleichermaßen explodieren, dann stimmt an der politischen Steuerung einiges nicht. Der Strommarkt ist ein Beispiel dafür, dass bei konstant gehaltenem Absatz immer mehr verdient werden kann.

Die Stromerzeugung in Deutschland basiert nach wie vor in erheblichem Umfang auf fossilen und damit CO₂ emittierenden Energieträgern. Tabelle 1 zeigt die letzten Entwicklungen. Der Anteil der Windkraft an der Stromerzeugung hat deutlich zugenommen, auch der Erdgasanteil. Der Anteil der Photovoltaik ist nach wie vor sehr niedrig.

Brutto-Stromerzeugung nach Energieträgern in Deutschland

Energieträger	2006 Mrd. kWh	2007* Mrd. kWh	2008* Mrd. kWh
Braunkohle	151,1	155,1	150,0
Kernenergie	167,4	140,5	148,8
Steinkohle	137,9	142,0	128,5
Erdgas	73,4	75,9	83,0
Mineralöl	10,5	9,7	10,5
Wasserkraft	26,8	28,1	27,0
Windkraft	30,7	39,7	40,2
Übrige	39,1	46,4	51,1
Bruttoerzeugung	636,8	637,6	639,1
Stromimport	46,1	44,3	40,2
Stromexport	65,9	63,4	62,7
Stromimportsaldo	- 19,8	- 19,1	- 22,5
Stromverbrauch einschl. Netzverluste	617,0	618,4	616,6

**Tabelle 1: Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung in Deutschland
(Quelle: Stat. Bundesamt, BGEW 2009)**

Die Stromwirtschaft hat nicht nur die Kosten der Förderung von erneuerbaren Energien nach dem EnEG an die Haushaltskunden weitergegeben können, sondern auch noch aus der (kostenfreien) staatlichen Vergabe von CO₂-Zertifikaten Gewinne erzielen konnten; es waren praktisch Sondergeschenke des Staates. In Zukunft werden allerdings CO₂-Emissionen tatsächlich etwas kosten, die EU hat dies durchsetzen können.

Angesichts des gesättigten Marktes stellt sich für die Stromwirtschaft die Frage nach weiteren Einkünften. Seit Jahrzehnten hat es immer wieder Bemühungen gegeben, z. B. durch RWE, Batterieautos zu lancieren, doch ohne Erfolg, weil es dazu keine technisch-ökonomische Basis gab. Insgesamt war bisher die Rolle der Strom-

konzerne im Verkehrsbereich nur marginal - sieht man einmal von dem Umstand ab, dass U- und S-Bahnen sowie Straßenbahnen mit Strom fahren. Die DB hat für ihren Strom eine Eigenproduktion mit getrenntem Netz.

In den letzten 3 - 4 Jahren ist mit dem E-Auto-Thema ein verstärktes Engagement zu erkennen, auch wenn allen Beteiligten klar ist, dass der Markt in den nächsten Jahren vernachlässigbar klein bleiben wird. Das Institut für Umwelt und Energie (IFEU) hat für das Umweltministerium errechnet, dass die von der Bundesregierung anvisierte 1 Million Elektrofahrzeuge – darauf wird weiter unten ausführlicher eingegangen - im Jahr 2020 deutlich weniger als 1% des Stromabsatzes ausmachen würde¹⁴.

Auch bei den Stromkonzernen geht es vor allem um Imagegewinn. So wirbt z.B. RWE mit „Erleben sie den Kraftstoff der Zukunft, RWE präsentiert Autostrom“. Auch wenn auf absehbare Zeit kein wirtschaftlich relevanter Absatz erreicht werden kann, werden Ladesäulen aufgebaut und es fahren „Roadshows“ durch Deutschland, bei denen der Eindruck vermittelt wird, RWE sei für die Autofahrer der Kraftstofflieferant der Zukunft. Damit soll von den wirtschaftlich wirklich interessanten Plänen abgelenkt werden, neue Kohlekraftwerke – Braunkohle und Steinkohle - zu bauen und Atomkraftwerke länger laufen zu lassen.

5. Das Ökoargument: Elektroautos für die regenerative Stromerzeugung

5.1 Das erste Argument (nochmals):

Elektrofahrzeuge als Null-Emissions-Autos

Im Abschnitt 3.1 wurde bereits mit einer Überschlagsrechnung gezeigt, dass aus heutiger Sicht ein elektrischer Antrieb von Kfz keine ökologischen Vorteile bringt. Berücksichtigt man dann noch die hohen Kosten und die Nebeneffekte, muss man von Nachteilen für den Klimaschutz sprechen.

¹⁴ IFEU (2007): Elektromobilität und Arbeitspapier Nr. 5 im Rahmen des Projektes „Energiebalance – Optimale Systemlösungen für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz“. Heidelberg

Bei den ökologischen Visionen zum Elektro-Auto wird jedoch nicht von Kohle- oder Atomstrom ausgegangen, denn ersterer hat zu hohe CO₂-Emissionen (und andere Schadstoffe) und Atomstrom soll ja nach geltender Rechtslage zurück gefahren werden. Man denkt an die Zukunft: Für das Elektroauto soll saubererer, regenerativ erzeugter Strom verwendet werden. Vorzugsweise wird dann bei CO₂-Vergleichen für E-Autos ein Null-Emissions-Strom angenommen und den CO₂-Emissionen heutiger Benzin- und Diesel-Pkw gegenüber gestellt.

Nun stellt sich allerdings die Frage, ob denn zusätzlich regenerativ erzeugter Strom für diese neue Aufgabe zur Verfügung steht. „Zusätzlich“ muss ja der Strom für Elektroautos deswegen sein, weil der Regenerativstrom in den deutschen Klimaschutzplänen bereits anders verplant ist.

Zum einen sollen die spezifisch (d. h. je Energieeinheit) hohen CO₂-Emissionen der Braunkohle-, dann der Steinkohlekraftwerke durch Wind- und Sonnenenergie ersetzt werden. Ein weiterer Aspekt der Klimaschutzstrategien wird in der Öffentlichkeit kaum diskutiert: Im sog. „Meseberg-Programm“ zur Einhaltung des 40 %-Klimagaseminderungszieles ist bis 2020 der Ersatz von Nachtspeicheröfen vorgesehen, da sie ca. 3% der Kohlendioxidemissionen Deutschlands verursachen. Nachtspeicherheizungen haben für die Stromkonzerne den Vorteil, lastschwache Zeiten zu nutzen und stellen deshalb eine sehr rentable Stromverkaufsform dar. Aus guten Gründen wird allerdings in den vergangenen Jahren das Heizen mit Strom nicht mehr unterstützt, denn die Gesamt-Energieeffizienz ist sehr schlecht.

Die Nutzung von Elektroautos könnte zukünftig diese Absatzlücke auffüllen; sie sollen dazu vorzugsweise nachts geladen werden und entsprechen damit dem Verbrauchsmuster von Nachtspeicherheizungen, da nachts vor allem von Braunkohle-, Steinkohle- und Atomkraftwerken Strom erzeugt wird, sogenannter Grundlaststrom, dessen Klimagasemissionen höher als die des durchschnittlichen deutschen Strommixes ist, zu dem ja auch – in steigendem Umfang – Gaskraftwerke gehören. Diese produzieren CO₂-günstigeren, aber relativ teuren Strom, haben allerdings den Vorteil, erheblich schneller als die Kohlekraftwerke hoch- und heruntergefahren werden zu können¹⁵. Sie sind also für Tagesspitzen unerlässlich. Für das Aufladen der Autobatterien wären die Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke

¹⁵ Kernkraftwerke sind ausschließlich für Grundlast interessant.

der Grundlast für die Stromwirtschaft ideal. Wie lautet nun die Umweltbilanz des Elektroautos?

5.2 Der genaue Vergleich: Elektroantrieb gegen Otto-/Diesel-Motor - Energieverbrauch- und Klimagasemissionsvergleich

Zur Beurteilung der Klimawirkung von elektrischen Fahrzeugen wird im Folgenden eine Vergleichsrechnung bezüglich der CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit herkömmlichem Verbrennungsmotor durchgeführt. Als Vergleichsfahrzeuge bieten sich dabei die Varianten des Smart ForTwo an, den es zum einen mit herkömmlicher Antriebstechnik und zum anderen – wenn auch bislang nur in Feldversuchen – mit einem Elektroantrieb gibt. Die beiden Varianten sind bezüglich Zuladung und Fahrleistungen durchaus vergleichbar – wenn man von der systemimmanenten kürzeren Reichweite des Smart electric drive einmal absieht.

Der Smart ForTwo electric drive verbraucht laut Herstellerangabe 12 kWh elektrische Energie je 100 km (Daimler AG, 2008). Bei einem durchschnittlichen CO₂- Ausstoß von 596 Gramm pro in Deutschland erzeugter Kilowattstunde Strom¹⁶ produziert ein Smart electric drive damit rund 71,5 Gramm CO₂ je gefahrenem Kilometer.

CO₂ Elektro-Auto mit Durchschnitts-Strom

71,5 g CO₂ je km

Der CO₂-Ausstoß der Diesel-Variante lässt sich wie folgt berechnen:

- Verbrauch laut Hersteller-Angabe: 3,3 l/100 km (Daimler AG 2009);
- Dieseldieselkraftstoff verfügt über einen Kohlenstoffgehalt von 86,3 %
- Diesel verfügt über eine Dichte von 830 kg/m³ bzw. 830 g/l

¹⁶ Durchschnittlicher Wert für Deutschland, Stand 2006; Angabe laut Umweltbundesamt

- Das spezifische Verhältnis Kohlenstoff zu CO₂ beim Verbrennungsvorgang beträgt 3,664

Damit ergibt sich für die Diesel-Variante:

CO₂ Diesel

$$\frac{3,3l}{100 km} * 86,3\% * 830 \frac{g}{l} * 3,664 = 86,6 g/km$$

Das ist zunächst für die Elektrovariante weniger CO₂ pro km als bei der Diesel-Variante. Allerdings stellt sich ja die Frage, ob der herangezogene Durchschnitts-Strom-Mix für die E-Auto Beladung richtig ist. Der ADAC hat derartige Überlegungen ebenfalls angestellt und eine Stromerzeugung auf reiner Steinkohlebasis betrachtet, dazu noch zusätzlich die Ottomotor-getriebene Variante des Smart ForTwo. Die Ergebnisse lauten:

Antriebs-Version	Smart ForTwo electric drive E-Motor	Smart ForTwo electric drive E-Motor	Smart ForTwo coupé 1.0 mhd Otto	Smart ForTwo coupé 0.8 cdi Diesel
Motorleistung	30 kW	30 kW	52 kW	33 kW
Eingesetzte Energie	Elektrisch/ Strom-Mix Deutschland	Elektrisch/ Steinkohle	Benzin	Diesel
CO ₂ – Emission	71 g/km	107 g/km	103 g/km	88 g/km

Tabelle 2: Gegenüberstellung von Elektro-, Otto-, Diesel-Smart

Wenn der Ladestrom aus Steinkohlekraftwerken kommt, dann ist die E-Variante die schlechteste für den Klimaschutz. Neben der CO₂-Bilanz ist auch der Energieverbrauch in der gesamten Kette von Interesse. Der höhere CO₂-Ausstoß eines mit Strom aus Steinkohle betriebenen Elektrofahrzeugs spiegelt sich auch im Primärenergiebedarf wieder, wie die folgende Berechnung zeigt.

Bei der **Smart-Diesel-Variante mit 3,3 l/100 km gilt mit** der Kraftstoffdichte 0,830 g je Liter, dem Brennwert von 45,9 MJ je kg Kraftstoff:

Energieverbrauch in MJ je 100 km:

$$= \frac{3,3l}{100 \text{ km}} * 0,830 \frac{kg}{l} * 45,9 \frac{MJ}{kg} = 125,7 \frac{MJ}{100km}$$

Die Berechnung des Primär-Energie-Bedarfs der **Elektro-Variante** bei reinem Steinkohle-Strom stellt sich folgendermaßen dar:

- Verbrauch 12 kWh je 100 km = 43,2 MJ je 100 km
- Auch wenn moderne Lithium-Ionen-Akkus über einen sehr hohen Wirkungsgrad verfügen, wird unterstellt, dass es zu Verlusten bei der Be- und Entladung i.H.v. 20 % kommt (Merten, et al., 2009 S. 6).
- Die Übertragungsverluste bei Stromverteilung werden mit 5 % angesetzt
- Der durchschnittliche Wirkungsgrad deutscher Steinkohlekraftwerke wird mit 40 % angesetzt.

Elektro-CO₂:

$$= \frac{43,2 \text{ MJ}}{100 \text{ km}} / 80\% / 95\% / 40\% = 142,1 \frac{MJ}{100km}$$

Zwar ist die Effizienz des eigentlichen Antriebsmotors bei einem Elektrofahrzeug derjenigen eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor weit überlegen¹⁷⁾, bei der Betrachtung einer kompletten „Well-to-Wheel“-Kette geht nicht nur der Vorteil verloren, die Elektrotraktion wird zum schlechteren Weg. Das liegt vor allem an den Effizienzverlusten auf dem Weg von der Erzeugung über die Verteilung bis hin zur Umsetzung des elektrischen Stroms in mechanische Energie im Elektrofahrzeug.

¹⁷ Alle Vergleiche zwischen elektrischen- und verbrennungsmotorischen Antrieben sind aus verschiedenen Gründen nur mit erheblichen Annahmen möglich. So werden die geringeren Fahrleistungen und geringen Reichweiten der E-Fahrzeuge nicht berücksichtigt; man müsste für einen reinen Motorenvergleich bei den Otto- und Dieselantrieben an sich geringere Motorleistungen und kleine Tanks einrechnen. Umgekehrt müsste man bei Elektroautos all die Komfortelemente wie Heizung, Klimaanlage etc. als separat mit Strom betrieben berücksichtigen. Im Winter würde man mit Heizung dann nur die halbe Strecke fahren können (- die geringere Kapazität der kalten Batterie ist dann auch zu berücksichtigen).

Ab einem Wirkungsgrad im Kraftwerk von ca. 45 % wären Elektrofahrzeuge rein rechnerisch energetisch gleichwertig – ein Wert, der von modernen Kohlekraftwerken durchaus erreicht und von GuD- oder KWK-Kraftwerken übertroffen wird.

Ein eventueller Vorteil der Elektrofahrzeuge bezüglich des CO₂-Ausstoßes hängt somit maßgeblich von der eingesetzten Primärenergie und von der Effizienz der zur Stromerzeugung eingesetzten Kraftwerke ab. Zur Reduktion der gesamten CO₂-Emissionen macht der Einsatz von Elektrofahrzeugen nur dann Sinn, wenn der eingesetzte Strommix massiv zugunsten alternativer Energien verändert wird. Dieses Erkenntnis findet sich auch in einem Kabinettsbeschluss der Bundesregierung zur sog. „Elektromobilität“ wieder: „Um die ambitionierten Zielsetzungen der Bundesregierung im Bereich der Energie- und Klimapolitik zu erreichen, ist es erforderlich, den zusätzlichen Bedarf an elektrischer Energie in diesem Sektor durch Strom aus erneuerbaren Energien zu decken.“

Das Wort „zusätzlich“ muss dann so verstanden werden, dass für die batterieelektrischen Fahrzeuge kein regenerativer Strom den anderen Nutzungen entzogen wird. Neben der umwelt- und klimapolitischen Komponente hat dies auch einen wichtigen volkswirtschaftlichen Aspekt: Alle bisherigen Studien zeigen, dass regenerativ erzeugte Energie in stationärem Einsatz mehr CO₂ je aufgewendeten Kosten einsparen kann als bei Autonutzung. (Zu den Kosten des E-Autos siehe an anderer Stelle.)

Das kann sich in Ländern wie der Schweiz oder Schweden, die bereits heute über einem hohen Anteil regenerativer Stromerzeugung verfügen, eventuell anders darstellen. Dabei darf aber nicht vergessen werden, dass das Stromverteilungsnetz in Europa ein Verbundnetz ist. Wird also Schweizer Strom in der Schweiz für Elektroautos genutzt, steht weniger regenerativer Strom für den Export, z.B. nach Deutschland zur Verfügung.

Da Autos weltweite Produkte sind – schließlich wird ja die E-Auto-Entwicklung auch als Sicherung eines zukünftigen Weltmarktes propagiert – wird man die E-Autos auch z. B. nach Ägypten, China oder Indien transportieren wollen – in Länder also, in denen wegen der dortigen Kohleorientierung bei der Stromerzeugung ein E-Auto deutlich höhere CO₂-Emissionen je km verursachen wird als ein modernes Verbrennungsmotor-Fahrzeug.

5.3 Perspektiven der zukünftigen Stromerzeugung

Gemäß der „Leitstudie 2008 zur Weiterentwicklung der Ausbaustrategie für erneuerbare Energien“ ist bei Beibehaltung der Regelungen des EEG bis 2015 damit zu rechnen, dass das Ziel der Bundesregierung, bis 2020 mindestens 30% Bruttostromverbrauchs aus regenerativen Energien zu decken, erreicht wird (Nitsch, 2008). Für die Zeit bis 2050 wird sogar ein Anteil von bis zu über 80% erneuerbaren Energiequellen prognostiziert (vgl. Bild 17).

Bei den folgenden Betrachtungen seien die Überlegungen in der von der Bundesregierung in Auftrag gegebene und oft genutzte Leitstudie unterstellt. Sie enthält sehr forcierte Anstiege im Bereich der regenerativen Energien und den – nach wie vor geltenden – Ausstieg aus der Kernenergie.

Es sei hier darauf hingewiesen: Bis nach 2040 sollen die CO₂-intensiven Braun- und Steinkohle-Kraftwerke im Grundlastbereich zur Verfügung stehen, bis nach 2030 dürften auch nachts kein „überschüssiger“ regenerativer Strom zur Verfügung stehen, um neue Stromverbraucher mit Null-Emissionen zu versorgen. Es ist also ökologisch unsinnig, das mit Recht aus dem Netz gedrängte Nachtheizen mit Strom durch Fahren mit Strom zu ersetzen.

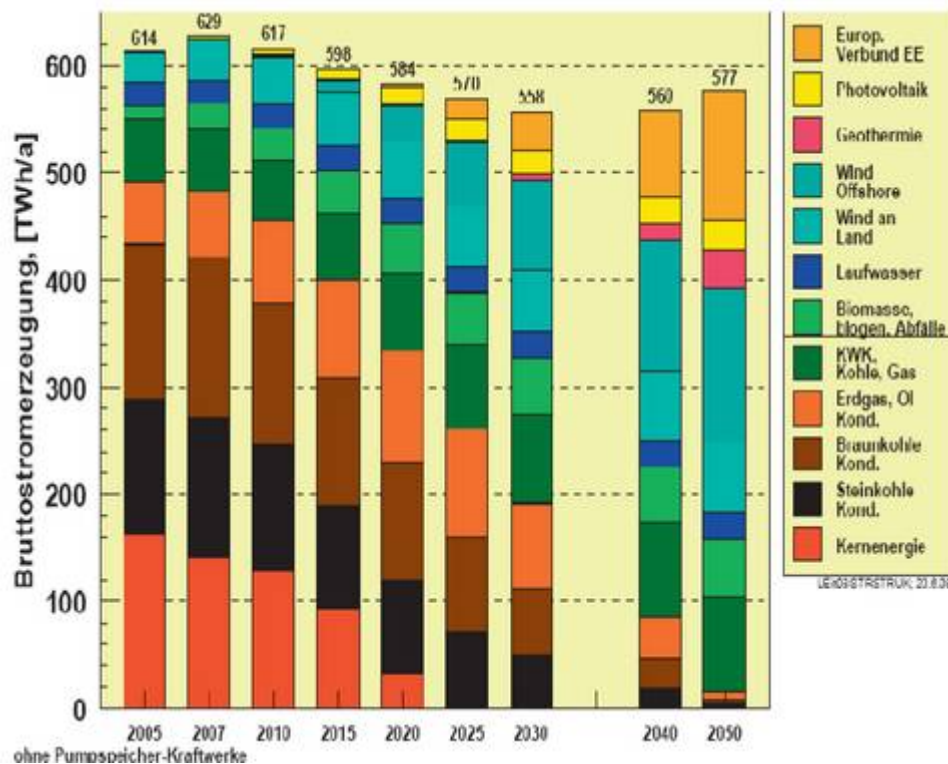


Bild 16: Struktur der Bruttostromerzeugung im LEITSZENARIO 2008 (Nitsch u. a. 2008)

5.4 Das zweite Ökoargument: E-Autos als Netzpuffer¹⁸

Ein großer Teil der zur Erzeugung von Strom eingesetzten erneuerbaren Energieträger wie Wind und Sonne unterliegt insbesondere aufgrund meteorologischer Gegebenheiten natürlichen Schwankungen. Die Regelung des Stromnetzes im Sinne des Ausgleichs von Stromeinspeisung und -entnahme wird schwieriger, da sich neben der Verbrauchsseite zunehmend auch die Angebotsseite des Strommarktes der direkten Regelung entzieht. Mit zunehmender Integration von E/E-Strom steigt damit der Bedarf an Regelenergie, d.h. von elektrischer Energie zum gegebenenfalls auch kurzfristigen Ausgleich von Schwankungen auf der Nachfrage- oder, im Falle von E/E-Strom, auf der Angebotsseite.

¹⁸ Quelle hier wesentlich: Pfister 2009. Fernuniversität Hagen

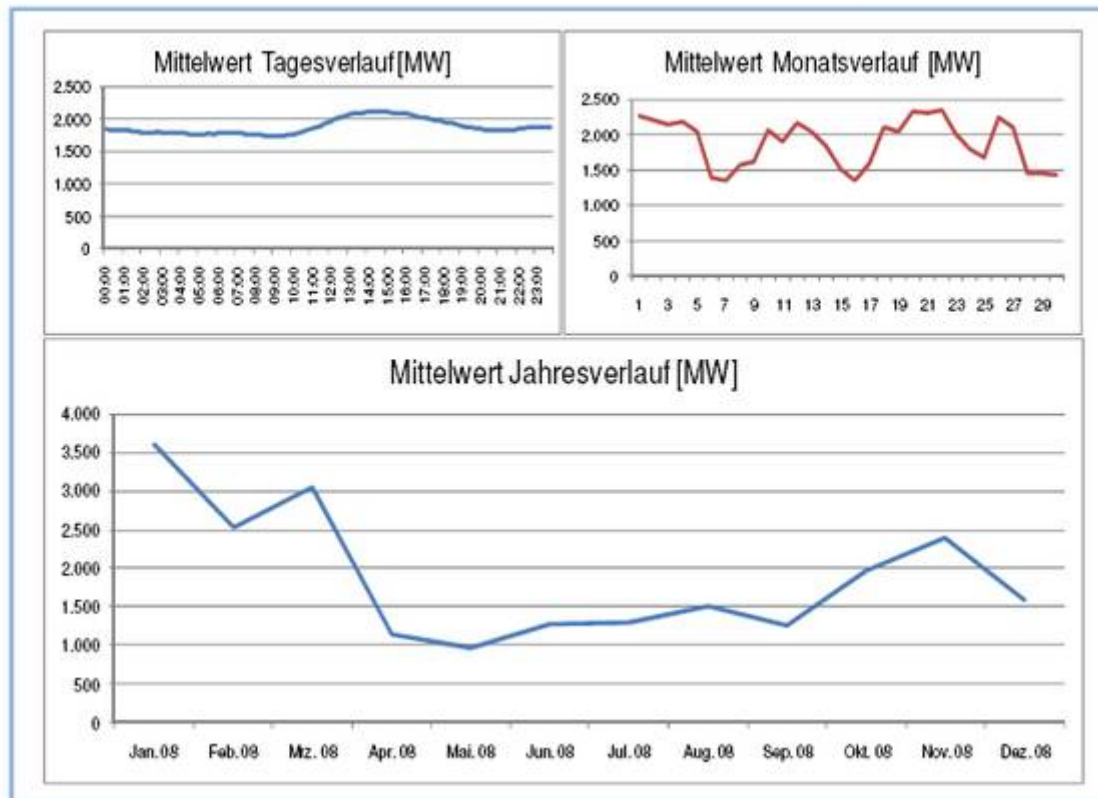


Bild 17: Einspeisung von Strom aus Windenergie in die Regelzone der E.ON Netz 2008. (Quelle: Pfister 2009, nach Daten aus e.on Netz GmbH, 2009)

Die Fluktuation bei der Erzeugung von Strom aus regenerativen Quellen wird im folgenden Abschnitt beispielhaft für die Windenergie bei E.ON dargestellt. Wie die in Abbildung 17 dargestellten Auswertungen des aus Windenergie erzeugten Stroms innerhalb der Regelzone der E.ON Netz GmbH im Jahr 2008 zeigen, treten bei der Erzeugung von Strom aus Windenergie insbesondere tageweise und jahreszeitlich erhebliche Schwankungen auf. Während die Ertragsschwankungen zwischen Winter- und Sommerhalbjahr mit einer gewissen Regelmäßigkeit auftreten, sind die Schwankungen innerhalb eines Monats eher zufälliger Natur und hängen von den jeweiligen meteorologischen Gegebenheiten ab.

Die mittlere Stromausbeute über einen Tag hingegen verläuft relativ konstant - dies ist allerdings so auch zu erwarten, da Windgeschwindigkeiten grundsätzlich nicht innerhalb weniger Stunden stark schwanken. Die in Abbildung 17 dargestellten Werte beziehen sich nur auf das Jahr 2008. Während die Grundaussage der

tageweisen und saisonalen Schwankung dieselbe bleibt, sind aber auch zwischen verschiedenen Jahren nicht unerhebliche Schwankungen in der Gesamtenergieausbeute zu beobachten.

Ähnliches gilt auch für die Erzeugung von Strom aus Sonnenenergie – gleichgültig, ob dabei solarthermische oder photovoltaische Technologien genutzt werden. Auch hier treten vor allem saisonale und tageweise, jedoch weniger tageszeitliche Schwankungen auf, insbesondere da bei solarthermischen Kraftwerken eine Speicherung der Wärmeenergie über mehrere Stunden, etwa über Nacht oder bei ungünstigen Wetterverhältnissen, in großen thermischen Speichern möglich ist.

Auch wenn unterstellt werden kann, dass die Schwankungen bei der Einspeisung von Windenergie aus Offshore - Parks geringer ausfallen, wird die Problematik des Lastmanagements mit zunehmendem Anteil von fluktuierenden erneuerbaren Energieträgern an der Brutto-Stromerzeugung dennoch immer drängender. Lt. dem sog. „LEITSZENARIO 2008“ (Nitsch 2008) steigt der Anteil fluktuierender Energieträger bis 2050 bis auf über 60 %. Solche Größenordnungen sind nicht ohne neuartige Lastmanagementsysteme zu bewältigen, da die heutigen Spitzenlastkraftwerke entweder mit fossilen Energien betrieben werden (bspw. Gasturbinen) oder hinsichtlich ihres Ausbaus an Grenzen stoßen (etwa Pumpspeicherkraftwerke).

Im Zusammenhang mit alternativen Antriebskonzepten werden dabei meist zwei Technologien diskutiert: Die Wasserstoffwirtschaft einerseits sowie die batteriebetriebene Elektromobilität unter der Bezeichnung „Vehicle to Grid“ auf der anderen Seite. Das Thema „Wasserstoff-Wirtschaft“ soll hier nicht weiter diskutiert werden.

Aktuell im Zusammenhang mit dem Elektroauto ist die Idee, die Fluktuationen im Elektrizitätsnetz, die durch Wind und Solarstromerzeugung auftreten, mit den Batterien der Pkw zu dämpfen. Die Elektrofahrzeuge („Vehicle“) wären dann nicht nur zum Aufladen, sondern kontinuierlich (natürlich außer wenn sie gefahren werden) an das öffentliche Netz anzuschließen („to Grid“) und deren Batterien als Speicher für momentan überschüssige elektrische Energie zu nutzen. Das Laden der Fahrzeuge soll in Zeiten geringer Stromnachfrage stattfinden; in Zeiten des Spitzenbedarfs findet eine Entladung und damit eine Abgabe von Strom an das öffentliche Netz statt.

Elektrische Energie fließt also grundsätzlich in beide Richtungen, je Fahrzeugbedarf und nach Netzbedarf vom Netz in die Batterie und umgekehrt. Ladestationen sollen sowohl in privaten Haushalten als auch auf Firmenparkplätzen sowie im öffentlichen Raum eingerichtet werden, damit möglichst oft die Fahrzeuge mit dem Netz gekoppelt sein können. Die Steuerung der Ladung und Entladung soll durch die Netzbetreiber über telematische Komponenten in den Fahrzeugen erfolgen.

Die elektrische Energie aus den Batterien der Elektrofahrzeuge soll insbesondere dazu genutzt werden, Spitzenlasten auszugleichen sowie die Nivellierung von Netzschwankungen durchzuführen. Der Vehicle to Grid-Ansatz bietet zunächst „nur“ eine neue Möglichkeit des Lastmanagements in öffentlichen Stromnetzen – eine Verbindung zu einer erweiterten Integration von erneuerbaren Energieträgern in die Stromproduktion ist nicht per se gegeben. Insofern ist dieser Ansatz im ersten Schritt eine neue Antwort auf ein altes rein energiewirtschaftliches Problem. Wie oben gezeigt wurde, besteht die Herausforderung bei der Integration fluktuierender Energieträger in das öffentliche Netz vorwiegend in deren saisonaler und tageweiser Schwankung. Solange man garantieren möchte, dass ein Elektrofahrzeug grundsätzlich immer auch wirklich einsatzbereit ist (und nicht gerade dann komplett entladen ist, wenn man es nutzen möchte), kann die in Elektrofahrzeugen gespeicherte Energie dagegen nur zum Ausgleich kurzfristiger Lastspitzen verwendet werden. Eine solche kurzfristige Speicherung von Strom über Stunden oder maximal einen Tag hinweg schafft bei der Integration fluktuierender Energieträger kaum Abhilfe.

6 Zusammenfassung

In den nächsten 15 Jahren wird das Elektroauto keinen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz liefern. Flottenversuche mit untauglichen Fahrzeugkonzepten sind nicht sinnvoll. Notwendig ist, die Energieeffizienz der konventionellen Fahrzeuge drastisch zu verbessern.

Dennoch ist es sinnvoll, die Forschung für bessere und vor allem kosteneffizientere Speichersysteme zu intensivieren. In – sehr langer – Sicht könnte regenerativ erzeugter Strom so umfangreich zur Verfügung stehen, dass Elektrotraktion zur sinnvollen Alternative für Verbrennungsmotoren wird. Voraussetzung ist aber, dass die Energieeffizienz der Fahrzeuge drastisch verbessert wird. Nur dann besteht Aussicht, dass mit verbesserten Batterien ausreichend attraktive und kosteneffiziente Elektrofahrzeuge eine Marktchance haben.

Die aktuellen Elektroauto-Aktivitäten von Wirtschaft und Politik schaden dem Klimaschutz, denn sie verdecken die wirklich effizienten Optionen zur Reduktion der Klimagase des Straßenverkehrs:

- Schnelle Verschärfungen bei den CO₂-Grenzwerten, z.B. maximal 80 g CO₂/km in 2020
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Öffentlichen Verkehrsmittel, durch bessere Verwendung der finanziellen öffentlichen Mittel

Zu den immer wieder hervorgehobenen Wirkungsgrad-Vorteilen des elektrischen Antriebes ist stets folgendes zu berücksichtigen: Alle Vergleiche zwischen elektrischen und verbrennungsmotorischen Antrieben sind nur mit erheblichen Annahmen möglich. Die veröffentlichten Berichte sind meist fachlich untauglich bis naiv¹⁹. So werden stets die geringeren Fahrleistungen und geringen Reichweiten der

¹⁹ So wurde am 2. 11. 2009 in der SZ ein begeisterter Bericht über einen vierwöchigen Alltagstest eines elektrischen BMW-Mini veröffentlicht, dabei auch der Stromverbrauch von 250 kWh für 860 km. Das sind mehr als 29 kWh je 100 km; mit den heutigen CO₂-Emissionen des Stromnetzes von knapp 600 g je kWh ergibt sich – umgerechnet – ein Wert von 174 g/km. Dazu eine Pressemitteilung vom Februar 2009: „KBA bestätigt führende Position der BMW Group bei der Verbrauchsreduzierung. Der Flottenmittelwert 2008 beträgt 158 g/km.“

E-Fahrzeuge nicht berücksichtigt. Man müsste für Vergleiche auch bei den Otto- und Dieselantrieben beispielsweise die geringeren Motor-Dauerleistungen und kleine Tanks einrechnen. Auch ist darauf zu achten, dass die wenigen Elektrofahrzeuge heute handgefertigt und hinsichtlich ihrer technischen Komponenten „handverlesen“ sind. In einer Serienfertigung sieht manches anders aus. Ferner müsste man bei Elektroautos all die Komfortelemente wie Heizung, Klimaanlage etc. als separat mit Strom betrieben berücksichtigen. Im Winter würde man z.B. durch die Heizung dann nur deutlich geringere Reichweite haben.

Literaturverzeichnis

IEA International Energy Agency (Hrsg.) (2008): World Energy Outlook. Paris.
<http://www.worldenergyoutlook.org/>

Daimler AG (2008): Electric drive. The Age of Electric Mobility Begins. Stuttgart.
www.daimler.com/.../1656483_daimler_inno_2008_booklets_electricdrive_en.pdf

Dietrich, P. (2008): **Die Personenwagen der Zukunft - Ist «Zero-Emission»** beim Auto auch klimaneutral? Vortrag PSI Competence Center Energy and Mobility (CCEM) Leibstadt. www.kkl.ch/upload/cms/user/Vortrag_Dr_Dietrich.pdf

Europäische Umweltagentur (2008) Energy and environment report 2008

http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_6

Europäische Umweltagentur (2005) The European environment - State and outlook 2005

http://www.eea.europa.eu/publications/state_of_environment_report_2005_1

Europäische Umweltagentur (2009) Transport at a crossroads. TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union, EEA Report No 3/2009

<http://www.eea.europa.eu/publications/transport-at-a-crossroads>

Intergovernmental Panel of Climate Change (2007) IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007

<http://www1.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>

Jochen, E. et al. (2008): Investitionen für ein klimafreundliches Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Synthesebericht PIK. Potsdam <http://www.klimainvest.de/download/synthese.pdf>

Leitinger, C. (2008): Elektrische Mobilität in Österreich: Voraussetzungen und Machbarkeit. Vortrag Energiegespräche Wien.

www.energyagency.at/fileadmin/aea/pdf/.../eg-10-2008-leitinger.pdf

Moordick, C (2009) The Electrification of the Automobile -Technical and economic challenges Vortrag LBBW 2009

http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/1719821_LBBW_Presentation_2009_06_10_final_distr_w_o_back_up.pdf

Nitsch, J. (2008): „Leitstudie 2008“. Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. in Zusammenarbeit mit der Abteilung „Systemanalyse und Technikbewertung“ des DLR Instituts für Technische Thermodynamik. Stuttgart. www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/.../leitstudie2008.pdf

Pfister, K. (2009): Möglichkeiten und Grenzen der Förderung nachhaltiger Mobilität mit Hilfe elektrischer Fahrzeuge. Arbeit im Rahmen des Masterstudiengangs der FernUniversität Hagen. (Betreuung: Prof. Dr. Rudolf Petersen)

Stat. Bundesamt/BDEW (2009): Brutto-Stromerzeugung nach Energieträgern in Deutschland. http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/DE_Brutto-Stromerzeugung_2007_nach_Energietraegern_in_Deutschland

Umweltbundesamt UBA (2009): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxidemissionen des deutschen Strommix. Dessau. <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>

Wallentowitz, H.; Gnörich, B. (2005): Entwicklungstrends in der Kfz-Antriebstechnik. Vortrag bei der Tagung der Deutschen Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge (DGES). Ingolstadt/Aachen.

Walraven, J. (2008): GM Fuel Cell Vehicle Integration. Vortrag AERTC Conference. http://www.aertc.org/conference/AEC_Sessions/Copy_of_Session_1