

2 Rahmenbedingungen aus ökologischer, technischer, gesetzlicher und sozio-ökonomischer Sicht

In diesem Kapitel werden zunächst die Umweltwirkung von CO₂-Emissionen und ihre Entstehung im Straßenverkehr in Abschnitt 2.1 näher beleuchtet. Dann werden in Abschnitt 2.2 die technischen Möglichkeiten zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Fahrzeug aufgezeigt und in Abschnitt 2.3 die wichtigsten ordnungsrechtlichen Initiativen zur Reduktion von CO₂-Emissionen im Straßenverkehr vorgestellt. Es folgen die sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen des Automobilmarktes, vor deren Hintergrund die Strategien der Automobilindustrie betrachtet werden müssen, in Abschnitt 2.4.

2.1 Wirkung und Entstehung von CO₂-Emissionen

Aufbauend auf der Darstellung der Bedeutung des globalen Ausstoßes von CO₂ für das Weltklima wird der Straßenverkehr als wesentliche Quelle von CO₂-Emissionen identifiziert. Anschließend werden grundlegende Möglichkeiten zu ihrer Reduktion abgeleitet.

2.1.1 Umweltwirkung von CO₂-Emissionen

Der Treibhauseffekt ist ein für das Weltklima wesentlicher Mechanismus. Die chemische Zusammensetzung der Erdatmosphäre führt dazu, dass ein Teil der durch die Sonne abgestrahlten und an der Erdoberfläche reflektierten Energie an den Gasschichten der Atmosphäre reflektiert wird. Im Laufe der Erdgeschichte hat sich ein Gleichgewicht zwischen einfallender und reflektierter Wärmeenergie entwickelt, welches das Leben auf der Erde ermöglicht. Dies wird als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet.¹⁴ Durch industrielle Aktivitäten und vor allem durch die Verbrennung fossiler Energieträger steigt die Menge der Gase, die in der Atmosphäre den Treibhauseffekt verursachen. Mit der Zunahme der Konzentration dieser Gase wird eine größere Menge der von der Erdoberfläche reflektierten langwelligen Sonnenstrahlung wieder zurück zur Erde reflektiert. Diese Veränderung der Reflektionseigenschaften der Erdatmosphäre bzw. die damit einhergehende Erderwärmung wird als vom Menschen verursachter, anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet.¹⁵ Bei Fortschreibung der aktuellen Entwicklung bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe könnten bis 2030 ca. 40 Gt CO₂ allein aus derartigen Verbrennungsprozessen stammen.¹⁶ Dies könnte zu einer Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur zwischen 2,4°C und 6,4°C bis zum Jahr 2100 führen.¹⁷ Durch den Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen wird es voraussichtlich zur Erhöhung des Meeresspiegels durch das Abschmelzen von Polar- und Gletschereis und durch wärmebedingte Zunahme des Wasservolumens kommen. Für Küstenbewohner steigt damit das Risiko von Überflutungen. Eine weltweite Häufung extremer Wetterphänomene, insbesondere lange Trockenheit, große Niederschlagsmengen oder häufige und starke Stürme, erscheint wahrscheinlich. Diese verursachen durch Ernteausfälle, Waldbrände, Bauschäden etc. signifikante volkswirtschaftliche Schäden.¹⁸

¹⁴ Das Glasdach von Treibhäusern sorgt dafür, dass ein Teil der einfallenden Sonnenstrahlen an der Innenseite des Daches reflektiert wird und so als Wärmeenergie im Gebäude bleibt.

¹⁵ UBA (2001), S. 127

¹⁶ IEA (2009)

¹⁷ IEA (2009) mit Bezug auf IPCC (2007a), S. 45, Szenario A1FI

¹⁸ Stern (2006), Munich Re (2007)

Treibhausgase sind langfristig und global wirkende Emissionen, die Einfluss auf das Klima haben. Neben Kohlenstoffdioxid (CO₂) gehören Methan (CH₄), Distickstoffmonoxid bzw. Lachgas (N₂O) und halogenierte Kohlenwasserstoffe (HKW) zu den Treibhausgasen.¹⁹ Da sie in unterschiedlichem Ausmaß klimawirksam sind, wird jedem Gas ein Gewichtungsfaktor zugeordnet, der sein Wirkpotential über einen bestimmten Zeitraum, beispielsweise 100 Jahre, widerspiegelt. CO₂ stellt mit einem Gewichtungsfaktor von eins die Referenzgröße dar.²⁰ Durch die Gewichtung kann jedes Gas in ein CO₂-Äquivalent umgerechnet werden, so dass die Wirkung der einzelnen Gase miteinander vergleichbar ist. Die Summe der CO₂-Äquivalente wird im Folgenden auch als GHG (engl. Greenhouse Gases) bezeichnet.

Mit dem zunehmenden Bewusstsein über die Rolle der GHG in Bezug auf den Klimawandel und dessen wirtschaftliche und soziale Auswirkungen rückt die Reduktion von GHG-Emissionen in den Fokus politischer Bemühungen. Im Rahmen des Kyoto-Protokolls von 1997 zur Ausgestaltung der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen wurden erstmals völkerrechtlich verbindliche Ziele für die Reduktion von Treibhausgasemissionen festgeschrieben.²¹ Industrieländer sollen beispielsweise zwischen 2008 und 2012 ihre jährlichen Emissionen um durchschnittlich 5,2% gegenüber 1990 reduzieren.²²

2.1.2 Bedeutung des Straßenverkehrs für die Entstehung von CO₂-Emissionen

Nach dem Sektor der Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung ist der Verkehrssektor weltweit derjenige mit dem dritthöchsten CO₂-Ausstoß. Im Jahr 2008 lag sein Anteil bei 22% der gesamten CO₂-Emissionen, siehe Abbildung 2. Innerhalb des Verkehrssektors dominiert der Straßenverkehr alle anderen Verkehrsmodi mit großem Abstand. So wie der gesamte Verkehrssektor unterliegt auch der Straßenverkehr hohen Wachstumsraten. Eine Zunahme der CO₂-Emissionen um über 40% zwischen 2007 und 2030 wird für möglich gehalten.²³ Damit könnte der Verkehrssektor bis 2030 für 97% des Wachstums der Nachfrage nach Erdöl verantwortlich sein,²⁴ dessen Verbrennung zu CO₂-Emissionen führt.

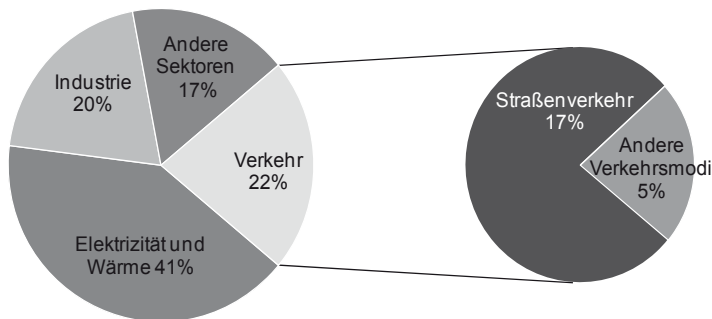


Abbildung 2: Weltweite CO₂-Emissionen 2008 nach Sektor²⁵

¹⁹ IPCC (2007a), S. 37

²⁰ IPCC (2007b), S. 212

²¹ UNFCCC (1998)

²² UNFCCC (1998), S. 20

²³ IEA (2009), S. 185

²⁴ IEA (2009), S. 42

²⁵ Eigene Berechnung nach IEA (2010), S. 9 f.

Der Straßenverkehr als CO₂-Emittent ist in den entwickelten Volkswirtschaften sogar noch bedeutender. Verkehrsaktivitäten ermöglichen Wirtschaftswachstum²⁶, welches seinerseits auch Verkehr induziert. In der EU-15 hatten CO₂-Emissionen aus dem Straßenverkehr im Jahr 2008 einen Anteil von 23 % an der Gesamtmenge der CO₂-Emissionen. Gleichzeitig war dieser Sektor zwischen 1990 und 2008 der mit Abstand am schnellsten wachsende.²⁷ Insofern ist mit einer weiteren Zunahme seines Anteils zu rechnen. In den USA lag im Jahr 2008 der Anteil von CO₂-Emissionen aus dem Verkehrssektor im Durchschnitt sogar bei 30%, bei einem Wachstum zwischen 1990 und 2008 von insgesamt 20%.²⁸ Dabei liegt der Anteil in einzelnen Bundesstaaten sogar noch höher, in Kalifornien beispielsweise bei fast 41%.²⁹

Sowohl im Verkehrssektor als auch bei der Erzeugung von Elektrizität und Wärme entstehen CO₂-Emissionen primär durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Erdöl. Kohle und Gas werden vor allem zur Befeuerung von Kraftwerken verwendet, während im Verkehrssektor hauptsächlich Derivate von Erdöl zum Einsatz kommen. Je größer die Menge des verbrannten Energieträgers, desto größer ist auch die Menge emittierten Kohlenstoffdioxids. Die jährlichen CO₂-Emissionen im Straßenverkehr können aus den drei Faktoren Fahrleistung, spezifischer Energieverbrauch und spezifische Emissionsintensität abgeleitet werden, siehe Formel (2.1).³⁰ Als Fahrleistung wird die von der Summe aller Fahrzeuge zurückgelegte Strecke pro Jahr bezeichnet. Der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch eines Fahrzeugs gibt an, wie viel Energie im Mittel benötigt wird, um ein Fahrzeug über eine Streckeneinheit anzutreiben. Als dritte Einflussgröße gibt die durchschnittliche spezifische Emissionsintensität die Menge von Emissionen an, die pro im Fahrzeug erzeugter Einheit physikalischer Arbeit im Mittel entsteht:

$$\mathcal{E}_{StrV}^{CO_2} = \mathcal{S}_{Fzg} \bar{C}_{Fzg}^W \bar{\mathcal{E}}_W^{CO_2} \quad (2.1)$$

- mit: $\mathcal{E}_{StrV}^{CO_2}$ [t CO₂/Jahr]: Jährliche CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs
 $\mathcal{S}_{Fzg}$ [km/Jahr]: Jährliche Fahrleistung der Summe aller Fahrzeuge
 $\bar{C}_{Fzg}^W$ [kWh/km]: Durchschnittlicher spezifischer Energieverbrauch je Fahrzeug
 $\bar{\mathcal{E}}_W^{CO_2}$ [t CO₂/kWh]: Durchschnittliche spezifische Emissionsintensität

2.1.3 Möglichkeiten zur Minderung von CO₂-Emissionen im Straßenverkehr

Die drei in Formel (2.1) genannten Einflussgrößen der CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs werden durch unterschiedliche Parameter und Akteure beeinflusst. Die jährliche Fahrleistung ist in hohem Maße abhängig vom allgemeinen Mobilitätsverhalten und damit von den Gewohnheiten der Vielzahl von Privatpersonen sowie von den wirtschaftlichen Aktivitäten der Unternehmen. Allgemein wächst die Fahrleistung bei gegebenem Straßennetz mit steigender wirtschaftlicher Aktivität, steigendem Einkommensniveau, steigender Einwohnerdichte sowie sinkenden Mobilitätskosten. Der durchschnittliche spezifische

²⁶ WBCSD (2004), S. 14

²⁷ EEA (2010), S. 113 f.

²⁸ EPA (2010a), S. 2-5

²⁹ CEC (2006), S. 8

³⁰ Für einen erweiterten Ansatz vgl. Kwon (2005). Ehrlich/Ehrlich (1990) bilden mit dem „IPAT“-Ansatz auf ähnliche Weise die Umweltwirkungen des Bevölkerungswachstums ab.

Energieverbrauch eines Fahrzeugs je zurückgelegter Streckeneinheit ist bedingt durch die Fahrweise im Sinne von durchschnittlicher Geschwindigkeit und dem Anteil von Beschleunigungsvorgängen, dem Streckenprofil, vor allem aber durch die physikalischen Eigenschaften des Fahrzeugs wie Fahrzeugmasse und -form. Je größer die für die Bewegung eines Fahrzeugs zu überwindenden Widerstandskräfte sind, desto mehr Energie muss der Antrieb je Streckeneinheit bereitstellen.³¹

Die spezifische Emissionsintensität ist determiniert durch den Kraftstoff sowie den Wirkungsgrad des Antriebssystems. Ein Liter Kraftstoff enthält je nach Sorte unterschiedlich große Mengen an Kohlenstoffverbindungen, die bei der Verbrennung in CO₂-Emissionen umgewandelt werden. Ebenso unterscheiden sich Kraftstoffarten durch die Menge gebundener chemischer Energie, die im Motor in Bewegungsenergie umgewandelt wird. Der Wirkungsgrad des Antriebssystems bestimmt darüber, in welchem Ausmaß diese Energie für die Fortbewegung genutzt wird bzw. wie hoch der Verlustanteil ist. Damit hat das Antriebssystem wesentlichen Anteil daran, wie viel Kraftstoff benötigt wird, um eine Leistungseinheit zu erzeugen.

Wie oben ausgeführt können die CO₂-Emissionen durch Verbesserung der konventionellen Antriebstechnologie oder durch alternative Antriebskonzepte deutlich gesenkt werden. Energieverbrauch und -intensität sind im Gegensatz zur Fahrleistung ganz wesentlich durch die technischen Eigenschaften des Fahrzeugs bzw. seines Antriebs determiniert. Diese werden im Gegensatz zur Fahrleistung durch Entscheidungen einer relativ geringen Zahl von Automobilherstellern und Kraftstoffproduzenten beeinflusst, so dass Forderungen, die Automobilindustrie gesetzlich zur Emissionsreduktion zu veranlassen, aus politischer Sicht zielführend erscheinen.³²

2.2 Automobilantriebe als Quelle von CO₂-Emissionen

Die Bedeutung des Straßenverkehrs als Quelle von CO₂-Emissionen fußt auf den technischen Eigenschaften heutiger Automobilantriebe, welche die notwendige Energie für die Fortbewegung erzeugen. In diesem Abschnitt werden zunächst der Energieverbrauch und die Energieintensität im Automobil dargestellt, um anschließend wesentliche technische Eigenschaften von heutiger Verbrennungsmotoren sowie alternativer Antriebe zu beschreiben.

2.2.1 Energieverbrauch und -intensität im Automobil

Energieverbrauch und -intensität des Verkehrs werden maßgeblich durch die technischen Eigenschaften von Automobilen bzw. Kraftfahrzeugen³³ und ihrer Antriebe beeinflusst. Technisch nutzbare Energie zur Fortbewegung wird im Kraftfahrzeug durch die Wandlung von Primärenergie in eine Sekundärenergie erzeugt, vgl. Abbildung 3. Dabei entsteht prinzipbedingt auch immer ein gewisser Anteil Verlustenergie. Zur Fortbewegung eines konventionellen Kraftfahrzeugs wird beispielsweise die in einem Energieträger wie Benzin oder Diesel gespeicherte chemische Energie im Motor in mechanische Energie gewandelt,

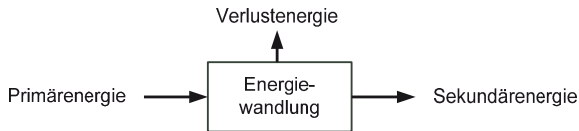
³¹ Überdies hat die Reduktion lokal wirksamer Abgase wie Kohlenstoffmonoxid (CO) oder Stickstoffoxide (NO_x) durch Abgasnachbehandlung seit den 1990er Jahren zu signifikant steigenden CO₂-Emissionen geführt, vgl. VDA (2006), S. 104, und VDA (2009), S. 152.

³² IEA (2010), S. 10

³³ Ein Kraftfahrzeug ist ein selbstfahrendes, maschinell angetriebenes Straßenfahrzeug, vgl. DIN 70010. In dieser Arbeit werden synonym auch die Begriffe „Fahrzeug“, „Automobil“ und „Pkw“ gebraucht.

welche dann auf die Antriebsräder übertragen wird. Dabei entsteht Verlustenergie in Form von Wärme, die über den Kühler an die Umgebung abgegeben wird.

Allgemeines Schema:



Beispiel:

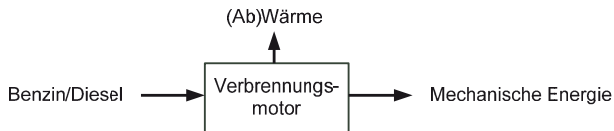


Abbildung 3: Schema der Energiewandlung im Automobil³⁴

Die im Motor erzeugte Energie lässt sich als Summe von effektiv erforderlicher Fortbewegungsenergie für ein bestimmtes Fahrmanöver und während der Erzeugung und Übertragung auf das Rad entstehender Verluste formulieren:

$$E = E^* + E^{ls} \quad (2.2)$$

mit: E [kWh]: Im Motor erzeugte Energie
 E^* [kWh]: Erforderliche Fortbewegungsenergie
 E^{ls} [kWh]: Verlustenergie

Dabei wächst die für ein Fahrmanöver erforderliche Antriebsenergie E^* , die notwendig ist, um ein bestimmtes Fahrmanöver durchzuführen, mit den hierfür zu überwindenden Kräften bzw. äußeren Fahrwiderständen, die in Rollwiderstand, Luftwiderstand und Beschleunigungswiderstand unterschieden werden können:³⁵

$$E^* = f(F_R, F_L, F_B) \quad (2.3)$$

mit: E^* [kWh]: Erforderliche Fortbewegungsenergie
 F_R [N]: Rollwiderstand
 F_L [N]: Luftwiderstand
 F_B [N]: Beschleunigungswiderstand

³⁴ Eigene Darstellung nach Merker/Schwarz (2009), S. 9

³⁵ Hoepke et al. 2004, S. 10

Je größer die Widerstandskräfte, desto mehr Energie muss aufgebracht werden, um das Fahrzeug fortzubewegen. Der Rollwiderstand ist vereinfacht formuliert das Produkt aus Fahrzeuggewicht und Rollwiderstandsbeiwert, der unter anderem abhängig von Form und Material der Reifen, dem Untergrund und der Geschwindigkeit ist:³⁶

$$F_R = f_R(v) \cdot m \cdot g \quad (2.4)$$

mit: F_R [N]: Rollwiderstand
 f_R [-]: Rollwiderstandsbeiwert für alle Räder
 m [kg]: Fahrzeuggewicht
 g [m/sec²]: Erdbeschleunigung

Der Luftwiderstand ist eine Funktion der Dichte der umgebenden Luft, ihrer Anströmgeschwindigkeit am Fahrzeug, der Form des Fahrzeugs und seiner Stirnfläche.³⁷ Dabei ist die Luftdichte abhängig von der Temperatur und dem Umgebungsdruck. Die Anströmgeschwindigkeit berechnet sich aus Windgeschwindigkeit und relativer Fahrzeuggeschwindigkeit. Fahrzeugform und -größe beeinflussen Luftwiderstandsbeiwert und Stirnfläche. Während ersterer experimentell im Windkanal ermittelt wird und allein von der Form abhängt, ist die Stirnfläche als Projektion der Fahrzeugfront auf eine senkrechte Fläche an die Fahrzeuggröße gekoppelt:

$$F_L = \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \cdot c_w \cdot A \quad (2.5)$$

mit: F_L [N]: Luftwiderstand
 ρ [kg/m³]: Luftdichte
 v_r [m/sec]: Anströmgeschwindigkeit der Luft
 c_w [-]: Luftwiderstandsbeiwert, abhängig von der Fahrzeugform
 A [m²]: Stirnfläche des Fahrzeugs

Führt das Fahrzeug keine gleichförmige Bewegung aus, werden Trägheitskräfte wirksam, die im Beschleunigungswiderstand Ausdruck finden. Dazu zählen sowohl die Trägheitskraft am Fahrzeug durch die translatorische Zunahme der Geschwindigkeit als auch die rotatorische Beschleunigung sich drehender Teile, die im Drehmassenzuschlagsfaktor zusammengefasst sind:³⁸

$$F_B = (1 + e) \cdot m \cdot a \quad (2.6)$$

mit: F_B [N]: Beschleunigungswiderstand
 e [-]: Drehmassenzuschlagsfaktor
 m [kg]: Fahrzeuggewicht
 a [m/sec²]: Beschleunigung des Fahrzeugs

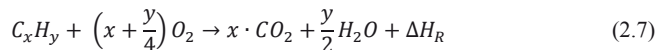
³⁶ Mitschke/Wallentowitz (2004), S. 70; Schnieder (2007), S. 44 ff.

³⁷ Mitschke/Wallentowitz (2004), S. 50 f.

³⁸ Mitschke/Wallentowitz (2004), S. 71

Um die im Motor zu erzeugende Energie E zu reduzieren, müssen die notwendige Antriebsenergie E^* und die Verlustenergie E^{ls} gesenkt werden. Die obigen Erläuterungen zeigen, dass die wesentlichen Parameter des Gesamtfahrzeugs, auf die im Rahmen der Reduktion von E^* konstruktiv Einfluss genommen werden kann, die Fahrzeugmasse, der Rollwiderstandsbeiwert, der Luftwiderstandsbeiwert, die Stirnfläche und der Drehmassenzuschlagsfaktor sind. E^{ls} dagegen ist vor allem abhängig von den Prozessen der Energiewandlung und -übertragung. Hier geht vor allem durch Reibung und thermische Verluste im Wandlungsprozess Energie verloren. Reibung entsteht an allen beweglichen Teilen und kann durch verbesserte Materialien bzw. Oberflächen und Lager reduziert werden. Thermische Verluste während der Energiewandlung können durch Verbesserungen im Prozessablauf oder durch Änderung des Prozesses erreicht werden. Je höher der Wirkungsgrad der Wandlung, desto weniger thermische Verluste treten auf bzw. je höher der Anteil der im Kraftstoff gespeicherten Energie, desto mehr mechanische Energie kann erzeugt werden.

Die Menge der CO₂-Emissionen pro durch Verbrennung erzeugter kWh Energie wächst mit der Menge verbrauchten Kraftstoffs und der Menge an Kohlenstoffatomen, die im Kraftstoff enthalten ist. Je mehr Kohlenwasserstoffe zusammen mit dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff verbrannt werden, desto größer die Menge an freigesetzten CO₂-Emissionen, was anhand der Bruttoreaktionsgleichung eines vollkommenen Verbrennungsvorgangs gezeigt werden kann:³⁹



mit: C : Kohlenstoff
 H : Wasserstoff
 O : Sauerstoff
 x : Anzahl Kohlenstoffatome
 y : Anzahl Wasserstoffatome
 ΔH_R : Reaktionsenthalpie

Die Reaktionsenthalpie bildet hier die durch die Reaktion freigesetzte Wärme ab. Weiterhin gilt, dass die kraftstoffspezifische Energiedichte und die Menge Kohlenwasserstoffe je Einheit Kraftstoff Einfluss auf die Menge von CO₂-Emissionen je erzeugter kWh Energie haben. Mit steigender spezifischer Energiedichte des Kraftstoffes und sinkender Menge Kohlenwasserstoffe sinken die CO₂-Emissionen:

$$M_{CO_2} = \frac{m_{CH}}{E_{fuel}} \quad (2.8)$$

mit: M_{CO_2} [g/kWh]: CO₂-Emissionen je erzeugter kWh Energie
 E_{fuel} [kWh/l]: Spezifische Energiedichte
 m_{CH} [g/l]: Spezifische Menge Kohlenwasserstoffe je Liter Kraftstoff

³⁹ Merker/Schwarz (2009), S. 174

Zur Reduktion der Energieintensität sollten also Kraftstoffe mit möglichst geringem Kohlenstoffanteil und solche mit hoher Energiedichte gewählt werden, so dass der Verbrauch insgesamt sinkt. Zum Vergleich werden in Tabelle 1 Energiedichte und CO₂-Emissionen für verschiedene fossile Energieträger und zum Vergleich elektrischem Strom in Deutschland angegeben. Es wird deutlich, dass beispielsweise Erdgas gegenüber Benzin und Diesel sowohl mehr Energie enthält als auch zu geringeren CO₂-Emissionen je erzeugter kWh führt. Aus diesem Grund ist Erdgas als „compressed natural gas“ (CNG) auch Bestandteil von Antriebsstrategien großer Automobilhersteller mit dem Ziel der CO₂-Reduktion.⁴⁰ Die spezifischen Emissionen der Stromerzeugung sind in hohem Maße vom eingesetzten Energieträger abhängig. In Deutschland ist beispielsweise der Anteil der bei der Verbrennung zu hohen CO₂-Emissionen führenden Braun- und Steinkohle an der Stromproduktion relativ hoch.

Tabelle 1: Energiedichte (Heizwert) und CO₂-Emissionen aus Verbrennung⁴¹

Energieträger	Energiedichte		CO ₂ -Emissionen		
	[kWh/l]	[kWh/kg]	[kg CO ₂ /l]	[kg CO ₂ /kg]	[kg CO ₂ /kWh]
Benzin	9	12,08	2,33	3,13	0,259
Diesel	9,89	11,92	2,63	3,17	0,266
Erdgas H	10/m ³	14,28	2,01/m ³	2,88	0,202
Strom⁴²	-	-	-	-	0,597

Nachdem erläutert wurde, wie grundsätzlich durch Energieerzeugung im Automobil CO₂-Emissionen entstehen, und wo generische Reduktionspotentiale bestehen, wird im Folgenden näher auf die Funktionsweise und charakteristischen Eigenschaften einzelner Kraftfahrzeugantriebe eingegangen.

2.2.2 Verbrennungsmotorische Automobilantriebe

Automobile werden heute mehrheitlich durch Verbrennungsmotoren angetrieben, die als Hubkolbenmotoren konstruiert sind. Bei Hubkolbenmotoren bewegt sich der Arbeitskolben rein translatorisch zwischen oberem Totpunkt (OT) und unterem Totpunkt (UT) (siehe Abbildung 4). Diese Hubbewegung wird über den Pleuel auf der Kurbelwelle in eine rotierende Bewegung umgesetzt, die auf die Räder übertragen werden kann. Die Verbrennung des Energieträgers findet im Brennraum zwischen UT und OT in einem Kreisprozess statt, der meist aus vier Arbeitstakten besteht während der sich der Kolben zweimal auf und ab bewegt. Der erste Arbeitstakt beginnt am OT und endet am UT. Während der Abwärtsbewegung des Kolbens wird bei geöffnetem Einlassventil über den Einlass ein Gemisch aus Luft und Kraftstoff angesaugt, welches sich im Brennraum verteilt. Während der folgenden Aufwärtsbewegung findet der zweite Arbeitstakt statt, währenddessen das Luft-Gas-Gemisch im Brennraum bei geschlossenen Ventilen verdichtet wird. Am OT entzündet sich das Luft-Gas-Gemisch und treibt den Kolben im dritten Arbeitstakt wieder nach unten. Bei Otto-Motoren wird das Gemisch extern mit Hilfe von Zündkerzen gezündet, bei Diesel-Motoren entzündet sich das Gemisch von selbst. Durch die Expansion entsteht die eigentliche Kraft, die über Pleuel und Kurbelwelle sowie Getriebe auf die Räder übertragen wird. Im vierten

⁴⁰ Volkswagen (2010)

⁴¹ BLfU (2009), eigene Berechnung

⁴² Für Deutschland, Stromerzeugung mit hohem Kohleanteil

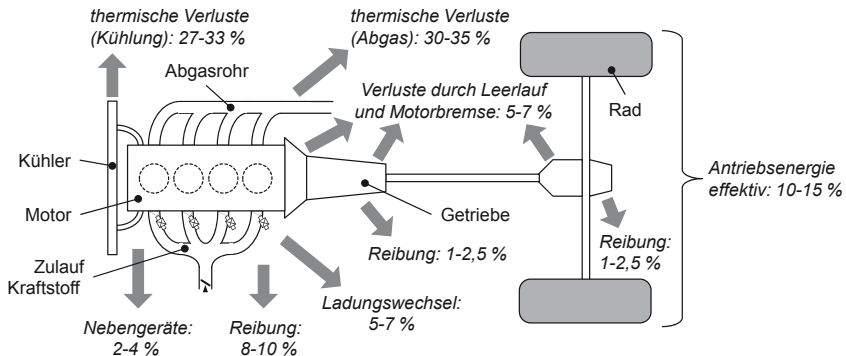


Abbildung 5: Verluste im Antriebsstrang eines konventionellen Pkw⁴⁵

Alternative Antriebskonzepte unterscheiden sich von konventionellen in verschiedenen Punkten. Sie bieten Vorteile im Wirkungsgrad, sind jedoch meist auch komplexer im Aufbau.

2.2.3 Alternative Antriebe für Automobile

Unter dem Sammelbegriff „alternative Antriebe“ werden alle Antriebsformen zusammengefasst, die andere Energieträger als Benzin und Diesel oder andere Formen der Energiewandlung als konventionelle Verbrennungsmotoren nutzen (siehe Tabelle 2). Aus verschiedenen Gründen emittieren alternative Antriebe oft weniger CO₂. Erdgas beispielsweise enthält weniger Kohlenwasserstoffverbindungen, wodurch im Verbrennungsprozess weniger CO₂ erzeugt wird. Alternative, nicht-fossile Energieträger haben eine geringere aggregierte CO₂-Bilanz, weil sie beispielsweise aus Biomasse wie Pflanzen oder Holzresten stammen. Gasförmige oder auch flüssige Biokraftstoffe führen zwar während der Verbrennung zu einer ähnlichen Menge von CO₂, allerdings wurde dieses zuvor während des Wachstumsprozesses der Pflanze gebunden. Insofern ist ihre Klimawirkung als gering einzuschätzen, da der CO₂-Anteil in der Atmosphäre nicht steigt. Wird Wasserstoff als Energieträger im Verbrennungsmotor genutzt, entsteht kein CO₂, da keine Kohlenstoffverbindungen verbrannt werden. Für die Produktion von Wasserstoff ist jedoch Primärenergie notwendig, bei deren Produktion CO₂-Emissionen entstehen, die dem Fahrzeug zugerechnet werden müssen, sofern sie aus nicht-erneuerbaren Rohstoffen erzeugt wird.

Alternative Antriebsstränge übertragen die Antriebsenergie nicht mehr rein mechanisch über Wellen und das Getriebe, sondern nutzen auch oder ausschließlich Elektromotoren⁴⁶. Diese erzeugen Bewegung durch die Nutzung elektromagnetischer Felder. Konstruktiv sind sie im Vergleich zu Verbrennungsmotoren sehr einfach aufgebaut. Ihre besonderen Vorteile im Automobil sind der hohe Wirkungsgrad und ihre Drehmomentcharakteristik. Bereits ab einer Drehzahl von Null steht das volle Drehmoment zur Verfügung, so dass meist kein Getriebe verwendet werden muss. Bei Hybrid-Antrieben finden Elektro- und Verbrennungsmotor in Kombination Verwendung. Je nach Konfiguration wird der Verbrennungsmotor als Radantrieb oder als Antrieb eines Generators zur Erzeugung elektrischer Energie eingesetzt.

⁴⁵ Modifiziert übernommen aus Wallentowitz et al. (2009), S. 153

⁴⁶ Meist Gleichstrom-, Reluktanz- oder Asynchronmotoren, vgl. Stan (2005), S. 223 ff.

Dieser kann jedoch auch innerhalb von Batterien gespeichert oder mit Hilfe von Wasserstoffbrennstoffzellen erzeugt werden. In beiden Fällen wird kein konventioneller Energieträger eingesetzt. Die benötigte elektrische Energie wird durch elektrochemische Reaktionen erzeugt.

Tabelle 2: Einsatz alternativer Energieträger und Antriebe im Automobil⁴⁷

	Konventioneller Antriebsstrang	Alternativer Antriebsstrang
Konventionelle Energieträger	Benzin/Diesel + Verbrennungsmotor	Benzin/Diesel + elektrifizierter Antrieb (Hybrid)
Alternative Energieträger	Erdgas/Biokraftstoffe/Wasserstoff + Verbrennungsmotor	Elektrischer Strom/Wasserstoff-Brennstoffzelle + Elektromotor

Je höher der elektrifizierte Anteil des Antriebs, desto umfangreicher sind konstruktionsbedingte Änderungen gegenüber konventionellen Fahrzeugen. Beim Einsatz alternativer Energieträger in Verbrennungsmotoren sind relativ geringe Änderungen am Antrieb erforderlich. Hybridantriebe erfordern im Prinzip den Einbau von zwei Antriebsarten, die aufeinander abgestimmt werden müssen. Mit dem Einsatz von Traktionsbatterien und Brennstoffzellen ändert sich der Antriebsstrang nahezu vollständig, was in Abbildung 6 verdeutlicht wird.

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor speichern Energie im Kraftstofftank. Der Kraftstoff wird im Motor während eines Verbrennungsprozesses in Antriebsenergie umgewandelt. Parallel-Hybride integrieren einen Elektromotor am Antriebsstrang, der durch eine Batterie angetrieben wird. Über ein Getriebe treiben je nach Fahrzustand der Verbrennungsmotor, der Elektromotor oder beide das Fahrzeug an. Elektromotoren können auch als Generator genutzt werden, so dass beispielsweise Bremsenergie zurückgewonnen und in der Batterie gespeichert werden kann. Unterschreitet der Ladezustand der Batterie eine gewisse Schwelle, wird die Batterie über den Verbrennungsmotor geladen. Bei so genannten Plugin-Hybriden wird die Batterie nicht nur durch den Generator geladen, sondern optional auch extern am Stromanschluss. Der Vorteil dieser Konfiguration ist, dass der Anteil der elektrisch zurücklegbaren Strecke erhöht wird.

Bei seriellen Hybrid-Fahrzeugen treibt ausschließlich der Elektromotor die Räder an. Die Traktionsbatterie, aus der die Energie bezogen wird, wird über einen Generator geladen, der mit einem Verbrennungsmotor⁴⁸ betrieben wird. Wie bei parallelen gibt es auch bei seriellen Hybrid-Fahrzeugen die Möglichkeit, sie als Plugin-Hybrid zu konfigurieren, damit die Batterie auch am Stromnetz geladen werden kann. Dieses Antriebskonzept wird heute oft als Zwischenschritt in der Entwicklung zum batterieelektrischen Antrieb diskutiert. Es vereint die Vorteile von konventionellem und elektrischem Antrieb, in Form hoher Reichweite bei hohem Antriebswirkungsgrad. Nachteilig wirkt sich die Notwendigkeit zweier Antriebe aus. Zum einen ist der konstruktive und entwicklungsseitige Aufwand für die Integration hoch, zum anderen führt die Vielzahl an Aggregaten zu einer hohen Fahrzeugmasse.

Der rein batterieelektrische Antrieb ist konstruktiv relativ einfach aufgebaut. Eine Batterie, die am Stromnetz geladen wird, betreibt einen Elektromotor, der direkt das Antriebsrad treibt.

⁴⁷ Eigene Darstellung

⁴⁸ In dieser Konfiguration auch als „Range-Extender“ bezeichnet.

Nachteilig auf die Reichweite wirkt sich die aktuell noch geringe Energiedichte der Batterien aus, die zudem eine hohe Masse aufweisen. Bei Fahrzeugen mit Brennstoffzelle wird aus Wasserstoff mittels einer chemischen Reaktion elektrische Energie gewonnen. Diese wird in einer Batterie gespeichert, um ebenfalls einen Elektromotor anzutreiben.

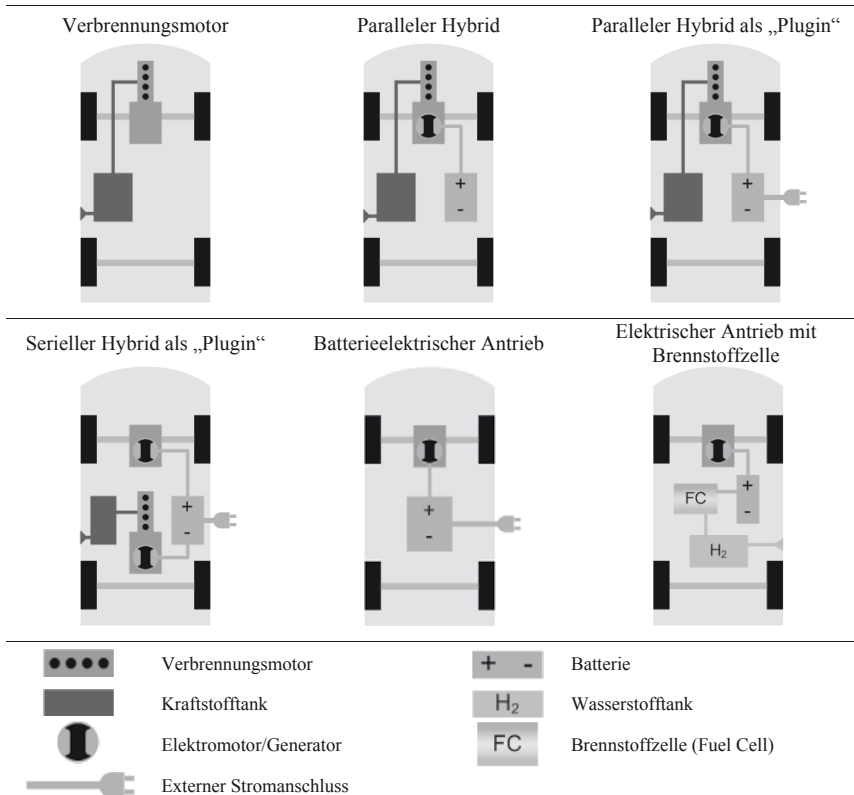


Abbildung 6: Grundlegende Antriebskonzepte⁴⁹

Elektrische Antriebe weisen große technische Unterschiede zum Verbrennungsmotor auf und sind im Hinblick auf relevante Fahrzeugeigenschaften weniger leistungsfähig. So haben Traktionsbatterien derzeit eine geringe Energiedichte, eine hohe Masse und eine begrenzte Einsatzdauer. Das führt zu im Vergleich mit konventionellen Antrieben signifikant geringeren Reichweiten und höheren Fahrzeugmassen. Gleichzeitig ist die Batterie als Energiespeicher extrem aufwändig herzustellen, während ein Benzintank ein sehr einfaches Bauteil darstellt.⁵⁰

In Brennstoffzellen wird chemische Reaktionsenergie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie transformiert. Brennstoffzellenfahrzeuge sind sehr aufwändig in der Herstellung und im Betrieb. Ihre Lebensdauer ist bisher ebenfalls relativ gering. Das hohe Wirkungsgradpotential kann bisher

⁴⁹ Modifiziert übernommen aus Rothfuss/Rose (2010)

⁵⁰ Stan (2005)

in der Praxis nur eingeschränkt umgesetzt werden.⁵¹ Die Anzahl von Aggregaten im Fahrzeug ist verglichen mit konventionellen Antrieben sehr hoch, unter anderem, weil die Kühlung aufwändiger ist. Die Notwendigkeit reinen Wasserstoffs für den Betrieb der Brennstoffzellen führt zu kostenintensiven Herstellungsprozessen.

Der Ausstoß von CO₂ ist Teil der chemischen Reaktion in Verbrennungsmotoren und somit eine technologieimmanente Eigenschaft. Durch die Reduktion von Verlustenergie im Motor oder von Fahrwiderständen am Fahrzeug sowie durch Teilelektrifizierung kann der Kraftstoffverbrauch und somit die CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs gesenkt werden. Überdies ist der Einsatz alternativer Kraftstoffe oder die Nutzung vollelektrischer Antriebe eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Reduktion der CO₂-Fahrzeugemissionen. Um später eine Einordnung dieser Maßnahmen hinsichtlich ihrer Eignung, gesetzliche Anforderungen einzuhalten, vornehmen zu können, werden zunächst die Anforderungen wichtiger Märkte im Detail analysiert.

2.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen hinsichtlich der CO₂-Emissionen von Pkw

Zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Straßenverkehr sind in den meisten Industrienationen ordnungsrechtliche Vorgaben inkraft oder geplant, die die Emissionen von Neufahrzeugen beschränken. Zu den weltweit bedeutendsten zählen u. a. aufgrund der Marktgröße jene in der Europäischen Union, den USA und insbesondere jene in Kalifornien. Sie werden im Folgenden detailliert erläutert.

2.3.1 Anforderungen an Automobilhersteller in der Europäischen Union

Während der Ausstoß von Abgasen wie Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (C_mH_n), Stickstoffoxiden (NO_x) und Feinstaub für Pkw schon seit Anfang der 1970er Jahre innerhalb der Europäischen Union (EU) gesetzlich limitiert ist,⁵² gilt für durchschnittliche CO₂-Flottenemissionen noch eine freiwillige Selbstverpflichtung der Automobilindustrie mit einem Wert von 140 g/km ab 2008.⁵³

Ab 2012 wird jedoch ein gesetzlich festgeschriebener fahrzeugmasseabhängiger Grenzwert für die durchschnittlichen Flottenemissionen eines Automobilherstellers eingeführt werden.⁵⁴ Mit Flotte wird hier die Summe aller verkauften Neuwagen bezeichnet. Der Wert Flottendurchschnittswert eines Herstellers berechnet sich nach folgender Formel:

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{\sum_i a_{ik} \varepsilon_{ik}}{\sum_i a_{ik}} \quad (2.9)$$

mit: $\bar{\varepsilon}_k$ [g/km]: Durchschnittliche CO₂-Emissionen aller verkauften Neuwagen von Anbieter k

a_{ik} [Pkw/Jahr]: Jährlicher Absatz von Fahrzeug i des Herstellers k

ε_{ik} [g/km]: CO₂-Emissionen von Fahrzeug i des Herstellers k

⁵¹ Eichlsleder/Klell (2010), S. 219

⁵² Die Richtlinie 70/220/EWG ist bereits seit 1970 inkraft, vgl. EU (1970). Aktuell gültig sind die Normen Euro 4 und Euro 5, vgl. EU (1998) und EU (2007)

⁵³ BMU (2007)

⁵⁴ EU (2009)

Die Messung der Fahrzeugemissionen erfolgt anhand eines genormten Testzyklus, in dem ein als repräsentativ angenommenes Streckenprofil gefahren wird.⁵⁵ In die Messung fließen alle wesentlichen Fahrzeugeigenschaften ein. Der Grenzwert wird abhängig von der Fahrzeugmasse und zwei im Gesetz festgeschriebenen Konstanten nach folgender Formel berechnet:

$$\mathcal{E}_i^* = 130 \frac{\text{g}}{\text{km}} + a (M_i - M_0) \quad (2.10)$$

mit: $\mathcal{E}^*$ [g/km]: Grenzwert für die CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs i
 a [g/km·kg]: Massenzuschlagsfaktor = 0,0457
 M_i [kg]: Leermasse von Fahrzeug i
 M_0 [kg]: Konstante Referenzmasse = 1372 kg

Diese Formel führt zu folgender „Emissionsgeraden“ (vgl. Abbildung 7), auf der sich der fahrzeugspezifische Grenzwert in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse ablesen lässt.

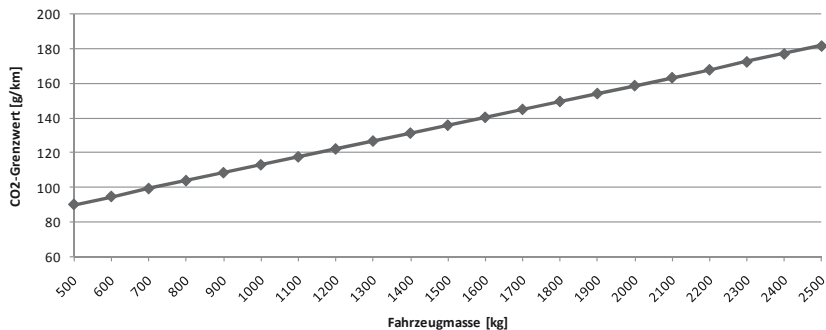


Abbildung 7: Zielvorgabe für spezifische CO₂-Emissionen je Neufahrzeug von 2012 bis 2015

Das langfristige Ziel der EU sind durchschnittliche CO₂-Emissionen von 95 g/km für Neufahrzeuge ab 2020. Es werden Strafzahlungen in Abhängigkeit von der Abweichung von den gesetzlichen Vorgaben zu leisten sein. Zunächst wird es jedoch eine Übergangsphase („Phase-in“) geben, in der geringere Anforderungen gelten werden und auch die potentiellen Strafzahlungen kleiner sein werden, siehe Abbildung 8 a). So werden im Jahr 2012 lediglich 65% der abgesetzten Neufahrzeuge im Durchschnitt den geforderten Grenzwert erreichen müssen. Diese Quote steigt 2013 auf 75 % und 2014 auf 80 %. Ab 2015 müssen dann 100% aller abgesetzten Fahrzeuge in die Bewertung des Flottenemissionswertes einfließen. Gleichzeitig werden besonders emissionsarme Fahrzeuge bei der Berechnung des Flottendurchschnittswertes höher gewichtet, siehe Abbildung 8 b). Liegen die CO₂-Fahrzeugemissionen unter 50 g/km so wird dieses Fahrzeug 2012 bis 2013 mit 3,5 gewichtet, in den Jahren 2014 und 2015 mit 2,5 respektive 1,5 und ab 2016 wieder mit 1,0. Darüber hinaus sind Sonderregelungen für die Nutzung so genannter „Öko-Innovationen“ geplant, beispielsweise besonders energiesparender Klimaanlagen. Für den Einsatz solcher Aggregate dürfen

⁵⁵ Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ), vgl. EU (1970)

zukünftig bis zu 7 g/km vom berechneten Flottenwert subtrahiert werden.

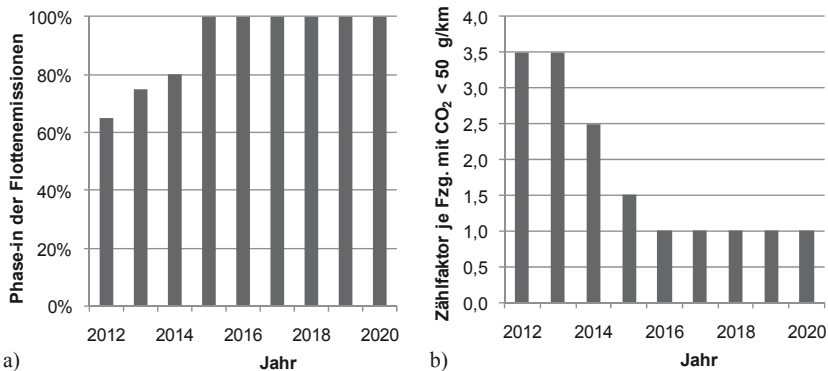


Abbildung 8: Phase-in der neuen EU-Gesetzgebung für CO₂-Flottenemissionen – Anteil der Flotte, die den Grenzwert einhalten muss (a) und Zählfaktor für Fahrzeuge mit besonders geringen Emissionen (b)

Ab 2019 muss ein Automobilhersteller bei Überschreiten des Grenzwertes pro g/km und abgesetztem Fahrzeug 95 EUR zahlen. Bis 2018 wird das erste g/km Überschreitung 5 EUR, das zweite g/km 15 EUR und das dritte g/km 25 EUR Strafe je verkauftem Fahrzeug kosten. Erst ab dem vierten g/km werden es 95 EUR sein. Bei einem Absatz von 1 Mio. Pkw/Jahr in der EU müsste ein Hersteller im Jahr 2012 somit 20 Mio. EUR und im Jahr 2019 190 Mio. EUR Strafen zahlen, wenn sein Flottenemissionswert 2 g über dem Grenzwert läge.

2.3.2 Anforderungen an Automobilhersteller in den USA

In den USA ist der Ausstoß von CO, NO_x, Feststoffen, Formaldehyd (HCHO) sowie nicht-methanhaltigen organischen Gasen (NMOG) für Kraftfahrzeuge gesetzlich reglementiert. Die USA sind dem Kyoto-Protokoll nicht beigetreten, deshalb finden CO₂-Emissionen in der Gesetzgebung nicht explizit Beachtung, wohl aber indirekt über die vorgeschriebene durchschnittliche Reichweite einer Gallone Benzin für Fahrzeuge mit weniger als 8.500 lb. Leermasse eines Herstellers, die „Corporate Average Fuel Economy“ (CAFE). CAFE wurde im Laufe der Ölkrise in den 1970er Jahren entwickelt. Der CAFE-Wert für einen Hersteller berechnet sich nach der Formel:⁵⁶

$$\overline{FE}_k = \sum_i a_{ik} * FE_{ik} / \sum_i a_{ik} \quad (2.11)$$

- mit: $\overline{FE}_k$ [mi/gal]: Durchschnittlicher Benzinverbrauch (Fuel Economy) aller verkauften Neuwagen von Anbieter k
- a_{ik} [Pkw/Jahr]: Jährlicher Absatz von Fahrzeug i des Herstellers k
- FE_{ik} [mi/gal]: Benzinverbrauch (Fuel Economy) von Fahrzeug i des Herstellers k

⁵⁶ NHTSA (2004), S. 2

Die Messung der Fahrzeugemissionen erfolgt ebenfalls anhand eines genormten Testzyklus⁵⁷, der jedoch anders strukturiert ist als in der EU. Strafzahlungen von \$ 55 je mi/gal, die der Grenzwert überschritten wird, werden erhoben. Dies wird mit der Summe aller abgesetzten Pkw und leichten Nutzfahrzeuge im betreffenden Jahr multipliziert.⁵⁸ Der CAFE-Grenzwert wurde im Rahmen der technischen Weiterentwicklung in der Automobilindustrie seit der Gesetzes Einführung im Jahr 1975 immer wieder angepasst⁵⁹, siehe Tabelle 3. Im Jahr 1978 lag der Grenzwert noch bei 18 mi/gal, was einem Verbrauch von 13,1 l/100 km oder CO₂-Emissionen von 488 g/mi bzw. 303 g/km entspricht. Seit 1990 ist der Grenzwert auf 27,5 mi/gal (8,6 l/100km Benzinverbrauch oder 320 g/mi bzw. 199 g/km CO₂-Emissionen). Im Vergleich zu europäischen Vorschriften sind damit die Vorschriften der US-Bundesbehörden weit weniger anspruchsvoll.

Tabelle 3: CAFE-Grenzwerte und äquivalente CO₂-Emissionen

Jahr	Grenzwert Verbrauch [mi/gal]⁶⁰	Grenzwert Verbrauch [l/100km]⁶¹	CO₂-Emissionen [g/mi]⁶²	CO₂-Emissionen [g/km]⁶³
1978	18,0	13,1	488	303
1979	19,0	12,4	462	287
1980	20,0	11,8	439	273
1981	22,0	10,7	399	248
1982	24,0	9,8	366	228
1983	26,0	9,0	338	210
1984	27,0	8,7	325	202
1985	27,5	8,6	319	199
1986	26,0	9,0	338	210
1989	26,5	8,9	332	206
1990	27,5	8,6	320	199
2007	27,5	8,6	320	199

Seit 2010 entwickeln die Bundesbehörden EPA und NHTSA auch Vorschriften zur expliziten Reduktion der durch Pkw verursachten Treibhausgasemissionen. Bis 2016 wird auf dieser Grundlage ein durchschnittlicher Verbrauchswert von 35,5 mi/gal (250 g CO₂/mi bzw. 155 g CO₂/km) angestrebt.⁶⁴

2.3.3 Anforderungen an Automobilhersteller im U.S.-Bundesstaat Kalifornien

In den USA existiert bisher keine einheitliche staatenübergreifende Abgasgesetzgebung. Kalifornien hat in diesem Bereich seit Langem eine Ausnahmestellung inne. Bevölkerungsdichte und Motorisierungsgrad gehören zu den höchsten in den USA, so dass Kalifornien den größten Einzelmarkt für Kraftfahrzeuge darstellt. Aufgrund seiner besonderen geografischen Randbedingungen findet über einem Großteil der bewohnten Gebiete nur ein geringer Luftaustausch statt, überdies treten häufig Inversionswetterlagen auf, was in Kombination mit

⁵⁷ Federal Test Procedure (FTP), vgl. EPA (2009)

⁵⁸ NHTSA (2004), S. 23

⁵⁹ BEST (2006), S. 114

⁶⁰ NHTSA (2004)

⁶¹ Eigene Berechnung mit 1 mi = 1,609 km und 1 gal = 3,785 l, Ergebnisse gerundet

⁶² Eigene Berechnung mit 8,788 kg CO₂-Emissionen je Gallone Benzin, Ergebnisse gerundet, vgl. EPA (2005)

⁶³ Eigene Berechnung mit 1 mi = 1,609 km, Ergebnisse gerundet

⁶⁴ EPA (2010b)

der intensiven Sonneneinstrahlung zu häufigem und lang andauerndem Smog führt.⁶⁵ In Kalifornien traten bereits sehr früh signifikante Gesundheitsprobleme durch Abgasemissionen auf, was dazu führte, dass hier die ersten Emissionsgrenzwerte für Kraftfahrzeuge erlassen wurden.⁶⁶ Seit ihrer Einführung durch das California Air Resource Board (CARB) hat eine Reihe weiterer Bundesstaaten diese Gesetzgebung übernommen oder erwägt dies zu tun, so dass die kalifornische Gesetzgebung derzeit für ca. 26% des Neu-Pkw-Absatzes in den USA gültig ist, bei steigender Tendenz.⁶⁷ Auch international hat die kalifornische Gesetzgebung seit den 1980er Jahren Vorbildfunktion gewonnen, beispielsweise bei der Entwicklung des gesetzlichen Rahmens zur Einführung des geregelten Katalysators in Deutschland.

Die für CO₂-Emissionen relevante Gesetzgebung besteht in Kalifornien aus zwei Teilen. Der eine Teil betrifft Greenhouse Gases (GHG) und enthält die Vorgaben für die Einhaltung eines Grenzwertes für durchschnittliche Flottenemissionen, deren Menge in CO₂-Äquivalenten angegeben wird, siehe Tabelle 4.⁶⁸ Der Grenzwert gilt für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis 3.750 lb. Leermasse.⁶⁹ Für größere Fahrzeuge gilt ein höherer Grenzwert.⁷⁰ Die Messung der Fahrzeugemissionen erfolgt anhand eines genormten Testzyklus.⁷¹ Elektrisch angetriebene Fahrzeuge werden mit einem im Gesetz fixierten Wert von GHG-Emissionen bewertet. So werden für batterieelektrische Fahrzeuge 130 g/mi und für Brennstoffzellenfahrzeuge 210 g/mi angesetzt.⁷²

Tabelle 4: Grenzwerte der GHG-Flottenemissionen für Fahrzeuge bis 3750 lbs. Leergewicht in Kalifornien

Jahr	Grenzwert [g/mi]	Grenzwert [g/km]⁷³
2009	323	201
2010	301	187
2011	267	166
2012	233	145
2013	227	141
2014	222	138
2015	213	132
ab 2016	205	127

Eventuelle Strafzahlungen werden mit Hilfe eines Credit-Systems berechnet. Am Ende jedes Jahres wird das Produkt aus der Summe aller verkauften Neufahrzeuge und der Differenz zwischen geforderten und tatsächlichen durchschnittlichen Fahrzeugemissionen in Form von GHG-Credits (Fahrzeug·g/mi) auf ein Konto gutgeschrieben. Liegen die Fahrzeugemissionen über diesem Grenzwert, wird die Differenz negativ, wird jedoch genauso dem GHG-Konto gutgeschrieben. Ist die Summe der über das Jahr angesammelten GHG-Credits zum Jahresende negativ, hat der Hersteller bis zu fünf Jahre Zeit, dieses Defizit durch überschüssige Credits aus vergangenen oder folgenden Jahren zu kompensieren. Gelingt dies nicht, müssen Strafzahlungen in Höhe von 5.000 \$ für jedes defizitäre Fahrzeug geleistet

⁶⁵ Engelhardt/Schaefer (1972), S. 645

⁶⁶ Bank (2000), S. 527

⁶⁷ Washington Post (2004), Delphi (2010), S. 37

⁶⁸ CARB (2009a), S. 63

⁶⁹ „Passenger Cars“ (PC), „Light Duty Trucks“ (LDT), vgl. CARB (2009a), S. 62

⁷⁰ CARB (2009a), S. 62

⁷¹ Federal Test Procedure (FTP), vgl. EPA (2009)

⁷² CARB (2009a), S. 67

⁷³ Eigene Berechnung mit 1 mi = 1,609 km, Ergebnisse gerundet

werden. Die Summe defizitärer Fahrzeuge berechnet sich aus der Summe negativer Credits für das betreffende Jahr dividiert durch den vor fünf Jahren gültigen GHG-Grenzwert.⁷⁴ Bei einem Absatz von 100.000 Fahrzeugen im Jahr 2010 würde somit eine Abweichung von 5 g/mi⁷⁵, die nicht kompensiert wird, mit Ende des Jahres 2015 zu einer Strafe von rund 8,3 Mio. \$ führen. Für kleine und mittelgroße Automobilhersteller mit einem durchschnittlichen jährlichen Absatzvolumen in Kalifornien von bis zu 60.000 Pkw sowie leichten und mittelschweren Nutzfahrzeugen gelten diese Vorschriften erst ab 2016.⁷⁶

Ein weiteres Gesetz beinhaltet Vorgaben für die Markteinführung elektrifizierter Antriebe ohne lokale Emissionen, so genannte Zero Emission Vehicles (ZEV). ZEVs werden abhängig von Antrieb und verschiedenen technischen Eigenschaften klassifiziert, siehe Tabelle 5. Zunächst wird zwischen Gold-, Silber-, Silber Plus- und Bronze-ZEVs unterschieden. Gold-ZEVs sind rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge, die im Betrieb keine schädlichen Gase emittieren. Sie werden abhängig von Antrieb, Reichweite und Lade- bzw. Tankzeit in sieben Typen eingeteilt. Für die Anmeldung eines Neufahrzeugs werden ein bis sechs ZEV-Credits gutgeschrieben. Besonders hoch werden dabei Fahrzeuge mit Wasserstoffbrennstoffzelle bewertet. Jeweils ein ZEV-Credit wird bereits für die Produktion der ZEV-Typen I bis V gutgeschrieben, auch ohne dass das Fahrzeug an einen Endkunden verkauft wird. Die Kategorie „Silber Plus“ enthält Fahrzeuge, die einen ZEV-Energieträger nutzen, jedoch trotzdem geringe Emissionen ausstoßen. Zu diesen Fahrzeugen, die auch „Enhanced Advanced Technology Partial Zero Emission Vehicle“ (EAT PZEV) genannt werden, gehören Plug-in Hybride und Verbrennungsmotoren, die mit Wasserstoff betrieben werden. Fahrzeuge der Kategorie „Silber“ werden auch „Advanced Technology Partial Zero Emission Vehicle“ (AT PZEV) genannt. Hierzu zählen Hybrid-Antriebe, CNG und Methanol-Brennstoffzellen. Sehr emissionsarme konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor werden in die „Bronze“-Kategorie eingeordnet. In der ZEV-Gesetzgebung werden sie als „Partial Zero Emission Vehicle“ (PZEV) bezeichnet. Ihre Spezifikation entspricht der Kategorie „Super Ultra Low Emission Vehicle“ (SULEV)⁷⁷, erweitert um eine Garantie von 150.000 Meilen oder 15 Jahren auf Funktionsfähigkeit. Emissionen durch Kraftstoffverdunstung dürfen nicht mehr auftreten.⁷⁸ Als Anreiz zur frühen Markteinführung von alternativen Antrieben werden die ZEV-Credits aller Fahrzeuge der Kategorien Gold, Silber Plus, Silber und Bronze von 2009 bis 2011 mit 1,25 multipliziert.⁷⁹

⁷⁴ CARB (2009a), S. 73; CDMV (2010)

⁷⁵ 5 g/mi = 3,11 g/km

⁷⁶ CARB (2009a), S. 70 f.

⁷⁷ SULEV = Super Ultra Low Emission Vehicle: 0,01g NMOG/Meile, 1g CO/Meile, 0,02g NO_x/Meile, 0,01g Partikel/Meile, vgl. CARB (2009a), S. 46

⁷⁸ CARB (2009a), S. 102

⁷⁹ CARB (2009a), S. 106 und S. 108

Tabelle 5: Klassifizierung und Bewertung von ZEVs⁸⁰

Kategorie	ZEV Typ	Definition	Beispiel	Credits 2009-2017	Credits 2018 ff.
"Gold"	ZEV Typ V	Elektrisch, Reichweite ≥ 300 Meilen, Schnellladung möglich	HFC, BEV	7	3
"Gold"	ZEV Typ IV	Elektrisch, Reichweite ≥ 200 Meilen, Schnellladung möglich	HFC, BEV	5	3
"Gold"	ZEV Typ III	Elektrisch, Reichweite ≥ 100 Meilen, Schnellladung möglich, oder BEV mit 200 Meilen Reichweite	HFC, BEV	4	3
"Gold"	ZEV Typ II	Elektrisch, Reichweite = 100-200 Meilen	BEV	3	3
"Gold"	ZEV Typ I.5	Elektrisch, Reichweite = 75-100 Meilen	BEV	2,5	2,5
"Gold"	ZEV Typ I	Elektrisch, Reichweite = 50-75 Meilen	BEV	2	2
	ZEV Typ 0	Elektrisch, Reichweite < 50 Meilen	BEV	1	1
	NEV	Elektrisch, max. Geschwindigkeit = 25 Meilen je Stunde	BEV	0,3	0,3
"Silber Plus"	Enhanced AT PZEV	PZEV mit einer Bewertung ≥ 1 Credit und der Möglichkeit der Nutzung eines ZEV-Antriebsmittels	Plug-in HEV, H ₂ -ICE	1 - 3 ⁸¹	0
"Silber"	AT PZEV	Erweitertes PZEV	HEV, CNG, Methanol-FC	0,2 - 3 ⁸²	0
"Bronze"	PZEV	Sehr emissionsarmer konventioneller Verbrennungsmotor (SULEV mit 150.000 Meilen/15 Jahren Garantie und ohne Emissionen durch Kraftstoffverdunstung)		0,2	0

Die ZEV-Gesetzgebung fordert den Absatz einer gewissen Menge von Neufahrzeugen, die den Kriterien für ZEVs entsprechen. Die Stückzahl berechnet sich aus dem Absatz konventioneller Fahrzeuge im vorangegangenen vierten, fünften und sechsten Jahr, multipliziert mit einem vorgegebenen Prozentsatz, der abhängig vom Modelljahr ist. Die Gesetzgebung gibt für jede Kategorie einen Anteil am Neuabsatz vor, der erreicht werden muss, siehe Tabelle 6. Dabei werden für die Zeit von 2009 bis 2011 zwei alternative Möglichkeiten angeboten, wie die Vorgaben erfüllt werden können. Bei Alternative 1 zählen alle ZEV-Typ 0 und NEVs zur Kategorie der Gold-ZEVs, bei Alternative 2 ist dies nicht der Fall.⁸³

⁸⁰ Eigene Darstellung nach CARB (2009a), S. 106 ff.

⁸¹ Abhängig von den technischen Eigenschaften des Antriebs, vgl. CARB (2009a), S. 105 f.

⁸² Abhängig von den technischen Eigenschaften des Antriebs, vgl. CARB (2009a), S. 105 f.

⁸³ CARB (2009a), S. 97

Tabelle 6: Geforderte Absatzanteile der verschiedenen ZEV-Klassen⁸⁴

Modelljahr	Anteil ZEV insgesamt	Min. Anteil Gold-ZEV	Max. Anteil EAT-PZEV, Typ 0 oder NEV	Max. Anteil AT-PZEV	Max. Anteil PZEV
2009 - 2011 (i)	11 %	2,475 %	2,475 %		5,5 %
2009 - 2011 (ii) ⁸⁵	11 %	0,82 %	4,13 %		6,05 %
2012 - 2014	12 %	0,79 %	2,21 %	3,0 %	6,0 %
2015 - 2017	14 %	3,0 %	3,0 %	2,0 %	6,0 %
2018 ff.	16 %	2,0 %	8,0 %		6,0 %

Je nach Unternehmensgröße kann diese geforderte Stückzahl auf verschiedene Art und Weise erfüllt werden. Automobilhersteller werden dabei in vier Klassen eingeteilt, siehe Tabelle 7. Das Produktionsvolumen eines Jahres berechnet sich als Durchschnitt aller produzierten und ausgelieferten Fahrzeuge für den kalifornischen Markt über die vorangegangenen drei Jahre. Für Großserienhersteller (Large Volume Manufacturer, LVM) gelten die strengsten Vorschriften. Sie müssen alle Details der gesetzlichen Anforderungen umsetzen. Ein mittelgroßer Hersteller (Intermediate Volume Manufacturer, IVM) ist nicht gezwungen, Gold-ZEVs herzustellen. Er kann diesen Anteil mit Silber Plus-, Silber- oder Bronze-ZEVs erreichen. Für kleine Hersteller (Independent Low Volume Manufacturer, ILVM, und Small Volume Manufacturer, SVM) mit einem Produktionsvolumen von unter 10.000 Pkw/Jahr gilt die ZEV-Gesetzgebung gar nicht.

Tabelle 7: Unterscheidung nach Unternehmensgröße im Rahmen der ZEV-Gesetzgebung⁸⁶

Hersteller-Status	Durchschnittliches Produktionsvolumen für Pkw, leichte und mittelschwere Nutzfahrzeuge für Kalifornien pro Jahr	Einhaltung der Anforderungen aus ZEV-Gesetzgebung
Large Volume Manufacturer (LVM)	>= 60.000	Wie oben beschrieben
Intermediate Volume Manufacturer (IVM)	10.000 – 59.999	Einhaltung vollständig mit EATPZEV, ATPZEV und PZEV möglich
Independent Low Volume Manufacturer (ILVM)	4.500 – 9.999	Keine
Small Volume Manufacturer (SVM)	< 4.500	Keine

Bei einem durchschnittlichen jährlichen Absatz von 100.000 Fahrzeugen müsste ein Hersteller im Jahr 2010 11.000 ZEV-Credits generieren, davon mindestens 2.475 aus Gold-ZEVs (Weg (i)). Zu diesem Zweck müssten beispielsweise 2.475 ZEVs der Typen I bis V produziert oder 354 Typ V-, 495 Typ IV-, 619 Typ III-, 825 Typ II-, 990 Typ I.5- oder 1.238 Typ I-ZEVs verkauft werden. Bezogen auf einen Gesamtabatz von 1.400.000 Fahrzeugen müssten 2010 bis zu 4.950 Fahrzeuge mit Wasserstoffbrennstoffzelle (Typ V) angemeldet werden.

⁸⁴ CARB (2009a), S. 96 ff.⁸⁵ Die Zuordnung der ZEV-Credits ist gegenüber (i) verändert.⁸⁶ CARB (2009a), S. 100 f.

Ähnlich wie bei der GHG-Gesetzgebung werden eventuelle Strafzahlungen auf der Basis eines Credit-Systems berechnet. Für jede ZEV-Kategorie werden im Fall der Übererfüllung der gesetzlichen Vorgaben Credits in Höhe der Differenz zwischen Soll- und Ist-Anzahl multipliziert mit dem jeweils aktuellen Grenzwert für Emissionen organischer Verbindungen außer Methan (= Non-Methane Organic Gases, NMOG)⁸⁷ gutgeschrieben. Dieses Vorgehen soll sicherstellen, dass aufgrund des über die Zeit sinkenden NMOG-Grenzwertes die Übererfüllung zu einem frühen Zeitpunkt höher belohnt wird als später, und dass entsprechende Defizite höher bestraft werden. Mit einem ZEV-Guthaben können Defizite der gleichen oder einer geringeren Kategorie ausgeglichen werden. Das heißt, ZEV-Credits aus dem Absatz von Gold-ZEVs tragen zur Erfüllung der Vorgaben für Silber-ZEVs bei, aber nicht umgekehrt. Gold-Credits werden überdies nach drei Jahren herabgestuft und sind nur noch für die Silber-Plus-Kategorie oder für geringere Kategorien gültig. Kann ein Defizit nicht innerhalb von drei Jahren nach Auftreten durch eine Menge von „Bonus-Credits“ in Höhe des Defizits multipliziert mit dem jeweils gültigen NMOG-Grenzwert ausgeglichen werden, sind Strafzahlungen zu leisten. Deren Höhe beträgt 5.000 \$ je defizitärem Fahrzeug. Die Summe defizitärer Fahrzeuge ist gleich der Summe defizitärer ZEV-Credits dividiert durch den im entsprechenden Jahr gültigen NMOG-Grenzwert.⁸⁸ Bietet der oben als Beispiel gewählte Hersteller mit einem jährlichen Absatz von 100.000 Fahrzeugen 2010 keine Gold-ZEVs an, so würde dies 2014 zu einer Strafe von 350 Mio. \$ führen. Im äußersten Fall der Nichterfüllung – dem ausschließlichen Absatz konventioneller Fahrzeuge – wären 2014 1,57 Mrd. \$ zu zahlen.

Um die Nachfrage nach ZEV zu unterstützen, stellt Kalifornien ein einmaliges Budget von 4,1 Mio. \$ für Kaufanreize bereit.⁸⁹ Beim Erwerb eines ZEVs des Typs I bekommt der Käufer 3.000 \$ erstattet, für den Typ I.5 sind es 4.000 \$ und für die Typen II bis V jeweils 5.000 \$. Für Plug-in Hybridfahrzeuge werden ebenfalls 3.000 \$ erstattet. Mit dem genannten Budget können 820 ZEV Typ V oder bis zu 1.366 Plug-In-Hybride zu einem geringeren Preis erworben werden. Darüber hinaus werden Hersteller verpflichtet, auf elektrische Speicher für Antriebsenergie 10 Jahre Garantie zu geben.⁹⁰ Die Anzahl der von jedem Automobilhersteller generierten ZEV-Credits wird regelmäßig veröffentlicht.⁹¹

Die Einhaltung der Anforderungen der kalifornischen GHG- und ZEV-Gesetzgebung stellt für Automobilhersteller eine anspruchsvolle Herausforderung dar. Im Falle der Nichteinhaltung drohen signifikante Strafzahlungen. Neben den gesetzlichen Rahmenbedingungen müssen Hersteller jedoch auch sozio-ökonomische Rahmenbedingungen beachten, die die eigentliche Grundlage für den Verkauf von Neufahrzeugen bilden.

2.4 Sozio-ökonomische Rahmenbedingungen des Automobilmarktes

Gesetzliche Vorgaben zur Reduktion von CO₂-Emissionen werden von Automobilherstellern vor dem Hintergrund der allgemeinen Marktentwicklung gesehen. Zusätzlich sind die besondere Bedingungen bei der Markteinführung von Innovationen sowie die grundsätzliche Abhängigkeit von Automobilen von der Versorgung mit Kraftstoff zu beachten. Deshalb

⁸⁷ CARB (2009a), S. 53

⁸⁸ CARB (2009a), S. 115

⁸⁹ CARB (2010a), S. 8

⁹⁰ CARB (2009a), S. 102

⁹¹ CARB (2010b)

werden folgend zunächst die allgemeine Wettbewerbssituation im Automobilmarkt sowie grundlegende Überlegungen zum Käuferverhalten dargestellt. Anschließend wird auf die zeitliche Entwicklung von neu in den Markt eingeführten Innovationen und die Bedeutung der Abhängigkeit des Automobils von komplementärer Infrastruktur eingegangen.

2.4.1 Wettbewerbssituation im Automobilmarkt

In den drei größten Automobilmärkten USA, EU und Japan, die zusammen zwei Drittel aller Neuwagen abnehmen, wächst der Absatz praktisch nicht mehr. Diese drei Märkte – die so genannte Triade – sind gesättigt.⁹² Dagegen steigen sowohl das durchschnittliche Fahrzeugalter des Bestands als auch die Nutzungsdauer von Fahrzeugen. So lag beispielsweise das durchschnittliche Alter des Fahrzeugbestands in den USA 1995 bei 8,4 Jahren, 2009 hingegen bei 10,2 Jahren.⁹³ Pkw, die in den 1970er Jahren produziert wurden, waren im Mittel 11,5 Jahre in Gebrauch, zwanzig Jahre später dagegen 16,9 Jahre.⁹⁴ Werden Fahrzeuge länger genutzt, sinkt bei gleichbleibendem Bestand jedoch der Neuwagenabsatz. Die wichtigsten Wachstumsmärkte sind Brasilien, Russland, Indien und vor allem China („BRIC-Staaten“).⁹⁵ Hier dominieren noch Erstkäufe gegenüber Ersatzkäufen.

Die Vielfalt angebotener Neufahrzeuge im Sinne von Antrieb-Segment-Kombinationen wächst immer weiter, um den immer differenzierteren Kundenwünschen zu entsprechen.⁹⁶ Zum einen steigt der internationale Wettbewerbsdruck, da jeder bedeutende Hersteller mittlerweile in allen wichtigen Märkten produziert, so dass frühere Absatzhemmnisse beseitigt sind.⁹⁷ So entstehen beispielsweise neue Segmente innerhalb des Produktportfolios. Zum anderen führt die Internationalisierung zu einer wachsenden Zahl einzuhaltender gesetzlicher Vorschriften. Dadurch müssen in immer höherem Maße alternative Antriebe, die nicht auf Basis von Otto- oder Dieselmotoren arbeiten, in Neufahrzeugen angeboten werden. Dadurch wachsen jedoch tendenziell auch die Überkapazitäten bzw. sinkt die Auslastung der vorhandenen Produktionsstätten.⁹⁸ Insbesondere in Märkten wie den USA, wo die Lagerfertigung bzw. der Absatz aus Händlerbeständen dominiert,⁹⁹ nehmen die Schwierigkeiten zu, Fertigungs- sowie Absatzplanung aufeinander abzustimmen. Dies führt wiederum zu einem sich verschärfenden Preis- und damit Kostenwettbewerb zwischen den Herstellern, denn um die Auslastung auf hohem Niveau zu halten, werden Preisnachlässe gewährt.¹⁰⁰ Um wachsende Rohstoff- und Energiekosten zu kompensieren¹⁰¹, müssen Fertigungsprozesse immer schneller verbessert und neue Materialien eingesetzt werden.

Zurzeit erscheint die Generierung von Produktinnovationen als einzige Möglichkeit für Automobilhersteller, um in diesem anspruchsvollen Marktumfeld erfolgreich zu sein.¹⁰² Bedingt durch diese Veränderungen ist die Komplexität in der Planung, Logistik und

⁹² Becker (2007), S. 89 f.

⁹³ Davis et al. (2010), S. 3-13

⁹⁴ Davis et al. (2010), S. 3-15

⁹⁵ Becker (2007), S. 95

⁹⁶ Becker (2007), S. 27 ff.

⁹⁷ Becker (2007), S. 16 ff.

⁹⁸ Becker (2007), S. 21 ff.

⁹⁹ Holwig/Pil (2004), S. 12

¹⁰⁰ Becker (2007), S. 33 ff.

¹⁰¹ Becker (2007), S. 127 ff.

¹⁰² Becker (2007), S. 111

Fertigung in der Vergangenheit stetig gestiegen. Der Umgang mit diesen Unsicherheiten wird durch eine wachsende Marktdynamik zusätzlich erschwert. Die resultierenden kombinatorischen und dynamischen Planungsprobleme bedingen insbesondere auch vor dem Hintergrund der Forderung nach nachhaltiger Wertschöpfung entsprechend leistungsfähige methodische Ansätze.¹⁰³

2.4.2 Käuferverhalten

Die automobilen Kaufentscheidung ist in ihrer Struktur überaus komplex und beinhaltet sowohl rationale faktenbasierte (technische Eigenschaften, Kosten etc.), als auch nicht-rationale, emotionale Anteile. Aufgrund des in Relation zu anderen Gütern hohen Kaufpreises des Automobils bei langer Nutzungsdauer, der geringen Häufigkeit des Automobilkaufs, und seiner Bedeutung für die soziale Stellung kann jedoch impulsives Verhalten nahezu ausgeschlossen werden.¹⁰⁴

Die Kaufhäufigkeit für Fahrzeuge je Bewohner einer Volkswirtschaft steigt mit dem jeweiligen Pro-Kopf-Einkommen¹⁰⁵ und sinkt mit steigenden Fahrzeug- sowie Kraftstoffpreisen. In Städten werden weniger Pkw gekauft als auf dem Land. Mit der Stadtgröße steigen die laufenden Kosten für den Besitz eines eigenen Fahrzeugs, während öffentliche Nahverkehrsnetze meist besser ausgebaut und kostengünstig nutzbar sind. Demografische Veränderungen wie auch eine veränderte Wohlstandsverteilung führen zu verändertem Kaufverhalten. Tendenziell sinkt die Zahlungsbereitschaft in den entwickelten Märkten, während weiterhin hohe Ansprüche an die Produktqualität und -sicherheit gestellt werden.¹⁰⁶

Zur Beschreibung des disaggregierten Käuferverhaltens kann die Präferenz als „eindimensionaler Indikator, der das Ausmaß der Vorziehwürdigkeit eines Beurteilungsobjektes für eine bestimmte Person während eines bestimmten Zeitraums zum Ausdruck bringt“¹⁰⁷ herangezogen werden. Sie korreliert in hohem Maße mit dem Kaufverhalten, ist einfach operationalisierbar und empirisch überprüfbar.¹⁰⁸ Eine exakte Prognose des Kaufverhaltens mit Hilfe des Konstruktes der Präferenz ist jedoch nicht möglich, da die Vorziehwürdigkeit eines Produkts nicht zwangsläufig zu seinem Kauf führt.¹⁰⁹

2.4.3 Marktentwicklung von Produktinnovationen

Die Marktanteilsentwicklung langlebiger Güter¹¹⁰ vom Zeitpunkt der Markteinführung bis zur Marktsättigung folgt meist einem charakteristischen Muster in Form einer S-förmig steigenden Kurve.¹¹¹ Innovationen kommen im Automobilmarkt in Form des „technology push“ in den Markt. Hersteller bieten dabei eine Innovation an, um einen Wettbewerbsvorteil

¹⁰³ Vgl. beispielsweise Volling (2009) oder Walther (2010)

¹⁰⁴ Vgl. Diez (2006), S. 51 f.

¹⁰⁵ Dargay/Gatley (1999)

¹⁰⁶ Diez (2006), S. 95; Becker (2007), S. 30 ff

¹⁰⁷ Böcker (1986), S. 556

¹⁰⁸ Gutsche (1995), S. 41; Fischer (2001), S. 15

¹⁰⁹ Hahn (1997), S. 11

¹¹⁰ Englisch: „durable goods“

¹¹¹ Mahajan et al. (2000)

zu generieren. Im engeren Sinne ist kein „market pull“¹¹² möglich, da Nutzer selbstständig keine einschneidenden technischen Veränderungen an den Produkten vornehmen können. Insbesondere Automobile sind technisch zu anspruchsvoll. Werden Innovationen durch gesetzliche Vorgaben motiviert, spricht man auch vom „technology forcing“ durch den Gesetzgeber.¹¹³

Während die Diffusion einer Innovation in den Markt oft auf den Einfluss von Werbung und der Kommunikation zwischen Käufern und Nichtkäufern („Mundpropaganda“) zurückgeführt wird, erscheint dieser einfache Erklärungsansatz für ein so komplexes und diversifiziertes Produkt wie das Automobil nicht hinreichend. Allerdings kann der Ansatz um weitere Mechanismen erweitert werden.¹¹⁴ Der erläuterte soziale Effekt der Informationsverbreitung durch Medien und Nutzer kann dabei weiterhin als Grundvoraussetzung für den Produkterwerb verstanden werden, denn wenn ein potentieller Käufer ein Produkt nicht kennt oder es nicht in seine Entscheidung einbezieht, ist kein Kauf möglich. Die Nachfrageentwicklung wird darüber hinaus aber auch von anderen Effekten getrieben, vor allem wenn konkurrierende Angebote existieren. Mit zunehmendem Absatz sinken Stückkosten¹¹⁵, so dass der Preis gesenkt werden kann. Dies führt tendenziell dazu, dass der Absatz steigt. Parallel wird ein Produkt mit steigendem Absatz leistungsfähiger, so dass seine Attraktivität aus Sicht des potentiellen Käufers wächst. Die Steigerung der Leistungsfähigkeit wird jedoch meist durch die Möglichkeiten der eingesetzten Technologie limitiert.¹¹⁶

2.4.4 Infrastrukturabhängigkeit von Kraftfahrzeugen

Kraftfahrzeuge sind infrastrukturabhängige Güter. Da die Kapazität heutiger Energiespeicher im Automobil nicht für die gesamte Nutzungsdauer des Fahrzeugs ausreicht, muss bei Bedarf neue Energie zugeführt werden. Diese Aufgabe erfüllen Ladestationen, die einen passenden Energieträger bereithalten. Heute sind dies beispielsweise Tankstellen, an denen Fahrzeugen Energie in Form von Otto- oder Dieselmotorkraftstoff zugeführt werden kann. Ein dichtes Netzwerk von Ladestationen gilt als Grundvoraussetzung für eine komfortable und für jedermann zugängliche motorisierte individuelle Mobilität. Die Verfügbarkeit der verschiedenen Energieträger an Tankstellen ist heute sehr unterschiedlich ausgeprägt, wie aus Tabelle 8 zu entnehmen ist. Die Anzahl von Tankstellen, an denen fossile Kraftstoffe getankt werden kann, ist im Vergleich zu jedem anderen Energieträger sehr hoch. Im besten Fall – CNG in Europa – ist der alternative Energieträger an 3% aller Tankstellen erhältlich. Das heißt, dass die räumliche Verfügbarkeit alternativer Energieträger bisher sehr begrenzt ist. Um ein entsprechendes Fahrzeug benutzen zu können, muss man in der Nähe einer Tank- oder Ladestelle wohnen. Dies kann die Marktentwicklung alternativer Antriebe hemmen, da die Anzahl potentieller Käufer, die das entsprechende Fahrzeug nutzen können, im Vergleich zum konventionellen Verbrennungsmotor viel geringer ist.

¹¹² Zur Unterscheidung von „technology push“ und „market pull“, vgl. Johnson et al. (2008), S. 326

¹¹³ Weider (2007)

¹¹⁴ Sterman (2000), S. 364 ff.

¹¹⁵ Henderson (1984), IEA (2000), S. 11

¹¹⁶ Wisséma (1982), Bowden (2004)

Tabelle 8: Anzahl verfügbarer Tank-/Ladestellen

Energieträger	Europa		USA ¹¹⁷		Kalifornien ¹¹⁸	
Benzin	111.100 ¹¹⁹	100 %	118.756	100 %	8.179	100 %
CNG	3.000 ¹²⁰	2,7 %	865	0,73%	212	2,6%
Ethanol (E85)	1.634 ¹²¹	1,4%	2.173	1,82%	53	0,65%
Elektrischer Strom	2.221 ¹²²	2,0%	607	0,51%	428	5,23%
Wasserstoff	65 ¹²³	0,056%	58	0,049%	22	0,27%

Der ökonomische Nutzen eines Produktes für ein Individuum ergibt sich häufig nicht nur aus dem direkten Gebrauch, sondern auch daraus, dass andere Individuen das Produkt ebenfalls einsetzen. Diese Produkteigenschaft wird als Netzwerkexternalität oder als Netzwerkeffekt bezeichnet.¹²⁴ Durch direkte Netzwerkeffekte führt der Gebrauch eines Produktes unmittelbar zur Steigerung seines Nutzens. Je mehr Telefone beispielsweise im Einsatz sind, desto mehr Menschen sind auch per Telefon erreichbar. Mit jedem hinzukommenden Benutzer eines Telefons steigt somit der Nutzen aller Telefonnutzer. Das gleiche gilt auch für andere Produkte der Kommunikationstechnik wie Telefax oder Datennetzwerke. Indirekte Netzwerkeffekte steigern den Nutzen eines Produktes durch die wachsende Anzahl oder wachsende Qualität komplementärer Produkte. Je mehr Menschen ein bestimmtes Computerbetriebssystem nutzen, desto mehr Software wird für dieses System entwickelt, wodurch der Einsatzbereich des Betriebssystems erweitert wird. Das gleiche Paradigma gilt für Videospiele, Ton- und Bildmedien sowie Verkehrsmittel.¹²⁵ Kompatibilität zwischen den komplementären Gütern ist dabei die Voraussetzung für deren Nutzen und damit für den Markterfolg.¹²⁶ Netzwerkeffekte führen dazu, dass mit der zunehmenden Anzahl von Produkten im Markt auch das Angebot komplementärer Güter wächst.¹²⁷ Je größer dieses Angebot ist, desto einfacher und nützlicher wird die Verwendung des Ausgangsproduktes. Ist dafür eine Infrastruktur notwendig, so wächst diese ebenfalls mit der Anzahl der Nutzer. Die Überlagerung der genannten Effekte führt ebenfalls zu einer S-Kurve bei der Entwicklung des Marktanteils über die Zeit.¹²⁸ Diese theoretischen Überlegungen werden durch die Analyse empirischer Daten unterstützt. Die Trajektorien historischer Verläufe der Marktentwicklung von Verkehrsmittelantrieben folgen wie in Abbildung 9 dargestellt meist einem S-förmigen Verlauf, wobei die Verbreitung der Infrastruktur der Marktentwicklung des entsprechenden Automobilantriebs meist zeitlich voraus geht¹²⁹.

¹¹⁷ U.S. Census Bureau (2007); DoE (2010)

¹¹⁸ U.S. Census Bureau (2007); DoE (2010)

¹¹⁹ Retail-Index.com (2010)

¹²⁰ CNGStations.com (2010)

¹²¹ Eigene Zählung auf Basis von Datenbankeinträgen, vgl. Ethanol-Tanken (2010)

¹²² Eigene Zählung auf Basis von Datenbankeinträgen, vgl. LEMnet (2010)

¹²³ Fuelcells.org (2009)

¹²⁴ Katz/Shapiro (1985), S. 424; Shy (2001), S. 3 ff.

¹²⁵ Katz/Shapiro (1985), S. 424; Katz/Shapiro (1986), S. 823; Gupta et al. (1999)

¹²⁶ Economides/Salop (1992); Shy (2001), S. 3

¹²⁷ Shy (2001)

¹²⁸ Sberman (2000), S. 359 ff.

¹²⁹ Grübler (1990)

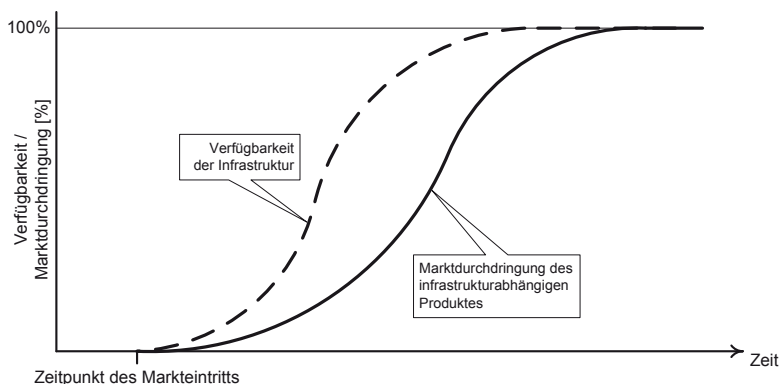


Abbildung 9: Marktdurchdringung eines infrastrukturabhängigen Produktes (qualitativ)¹³⁰

Der aktuell geringe Absatz von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben kann auch auf die geringe Verfügbarkeit komplementärer Energieträger zurückgeführt werden. Denn selbst bei einer zunächst geringen Zahl von Käufern sollte die Infrastruktur bereits eine hohe Verbreitung aufweisen, um signifikanten Nutzen für den Kunden zu aufzuweisen.¹³¹ Es zeigt sich, dass diese systemischen Hindernisse gerade im Automobilbereich ein spezielles Problem für den Markteintritt alternativer Antriebe darstellen, da heute bereits quasi ubiquitär vorhandene eine Infrastruktur für fossile Kraftstoffe existiert. Konventionelle Antriebe besitzen gegenüber neu in den Markt eintretenden Antrieben einen kompetitiven Vorteil. Dieser so genannte Lock-in-Effekt führt zu Pfadabhängigkeit¹³² und verhindert die Entwicklung anderer Infrastrukturen. Kunden scheuen sich, ein Fahrzeug zu kaufen, welches sie nicht tanken bzw. laden können. Im Gegenzug bauen Infrastrukturbetreiber keine neuen Netze auf, wenn diese nicht genutzt werden. Automobilhersteller entwickeln keine Fahrzeuge, die sie voraussichtlich nicht absetzen können.¹³³ Durch diese Netzwerkeffekte bietet beispielsweise ein mit Wasserstoff betriebenes Fahrzeug derzeit nur einen geringen Nutzen, wenn der komplementäre Kraftstoff (Wasserstoff) nicht flächendeckend verfügbar ist.

Die sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen stellen ähnlich den gesetzlichen Anforderungen eine große Herausforderung für Automobilhersteller dar. Die Situation verkompliziert sich für Hersteller weiter, da alle Rahmenbedingungen parallel bzw. gleichzeitig berücksichtigt werden müssen. Die gesetzlichen Anforderungen müssen eingehalten werden, um langfristig Fahrzeuge verkaufen zu dürfen. Die sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen bilden dabei die Grundlage für den eigentlichen Absatz von Neufahrzeugen. Um die fristgerechte und dauerhafte Einhaltung gesetzlicher Anforderungen sicher zu stellen, ist die Entwicklung von Strategien für die Reduktion der CO₂-Flottenemissionen und die Markteinführung elektrifizierter Antriebe notwendig, die auch der Komplexität des Marktumfelds gerecht werden.

¹³⁰ Eigene Darstellung

¹³¹ Van Voren (2010)

¹³² Liebowitz/Margolis (1995), Sterman (2000), S. 359 ff.

¹³³ Melaina/Bremson 2008, S. 3224

Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur
Reduktion von CO₂-Flottenemissionen und zur
Markteinführung alternativer Antriebe
Ein systemdynamischer Ansatz am Beispiel der
kalifornischen Gesetzgebung

Wansart, J.

2012, XXXIV, 214 S. 54 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-8349-4498-6