



Der Pkw-Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt

Szenario-Analyse im Auftrag des
Mineralölwirtschaftsverbandes



Titel	Der Pkw-Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt
Thema	Szenario-Analyse Pkw-Markt
Schlüsselwörter	VECTOR21, Szenario, Elektromobilität, Pkw-Markt
Zugänglichkeit	
Autoren	Dipl.-Wi.-Ing. Jens Brokate Dr.-Ing. Enver Doruk Özdemir Dr.-Ing. Ulrike Kugler

	Name	Datum
Geprüft von	Dr. Stephan Schmid	21.08.13
Freigegeben von	Prof. Horst E. Friedrich	21.08.13

Stuttgart, August 2013

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Fahrzeugkonzepte

Prof. Dr.-Ing. H. E. Friedrich

Pfaffenwaldring 38-40

D-70569 Stuttgart, GERMANY

Kurzfassung	4
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Einführung	10
Herangehensweise.....	11
Szenario-Modell VECTOR ₂₁	11
Rahmendaten und Szenarienaufbau	15
Einflussfaktoren	15
Betrachtete Antriebskonzepte und Fahrzeugeigenschaften.....	16
Technologisches CO ₂ -Reduktionspotential und Kostenentwicklung	19
Konventionelle Kraftstoffe	21
Elektrizität und Elektromobilität	22
Wasserstoff.....	23
CO ₂ -Gesetzgebung.....	24
Szenarienaufbau	25
Ergebnisse der Szenarioanalyse	27
Basis-Szenario.....	27
Alternative Szenarien	36
Zusammenfassung der Szenarioergebnisse	42
Literatur	44
Anhang.....	46

Kurzfassung

Die Bundesregierung hat mit dem Energiekonzept ehrgeizige Klimaschutz- und Effizienzziele für das gesamte Energiesystem gesetzt. Andererseits ist individuelle Mobilität für alle Bevölkerungsschichten Ausdruck persönlicher Freiheit und für viele Menschen tägliche Notwendigkeit. Da Klimaschutz im Verkehr sehr wahrscheinlich mit erhöhten Kosten einhergeht, müssen Vor- und Nachteile aller Antriebsformen und Energieträger sorgfältig abgewogen werden, um der hohen Bedeutung und Emotionalität des Themas gerecht zu werden und Mobilität für alle bezahlbar bleibt. In diesem Spannungsfeld untersucht die vorliegende Studie die mögliche Entwicklung für den deutschen Pkw-Markt vor dem Hintergrund sinkender CO₂-Flottenzielwerte bis zum Jahr 2040. Auf Basis von Szenarien werden u.a. verschiedene Verläufe des Emissionsgrenzwertes aus Kundenperspektive untersucht und die Auswirkungen ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Halbierung der CO₂-Emissionen im Pkw-Bestand ohne den Wechsel auf andere Verkehrsträger möglich ist. Hochwertige Kraftstoffe in Kombination mit innovativen Verbrennungsmotoren ermöglichen Effizienzverbesserungen von über 30 Prozent und tragen den Klimaschutz in die Breite der Flotte, und zwar sowohl mit konventionellen Fahrzeugen wie auch Hybridmodellen. Hinzu kommen der kontinuierlich steigende Anteil der elektrisch zurückgelegten Fahrstrecke und langfristig signifikante Marktanteile alternativer Antriebe.

Auch bei einer Verschärfung des Emissionsgrenzwerts auf 45 g CO₂/km im Jahr 2040, wie im Basis-Szenario umgesetzt, haben 85 Prozent der verkauften Neuwagen einen Verbrennungsmotor installiert, der zum Teil als Reichweitenverlängerer fungiert. Betrachtet man den Fahrzeugbestand, liegt der Anteil noch bei 95 Prozent. Ein Verbrennungsmotor wird auch bei starker Hybridisierung neben der Traktionsbatterie an Bord des Autos notwendig sein, um die Mobilitätsbedürfnisse zu erfüllen.

Der Kunde steht mit seiner Kaufentscheidung im Mittelpunkt der Analyse

Die Kundenperspektive, methodisch umgesetzt im DLR Modell *VECTOR21*, ermöglicht eine realitätsnahe Simulation der zukünftigen Marktentwicklung verschiedener Antriebstechnologien und Energieformen. Der Kunde entscheidet, welches Fahrzeug er kauft und damit, wie die Fahrzeugflotte in Zukunft aussehen wird. Mit mehr als 900 Kundentypen reicht das Spektrum vom „Innovator“, der neuen Antriebstechnologien gegenüber besonders aufgeschlossen ist, bis hin zum „Nachzügler“, der rein ökonomisch entscheidet. In der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass die heutigen Mobilitätsbedürfnisse der Kunden auch in Zukunft erfüllt werden.

Das Auto fährt in Zukunft mit einem breiteren Energieträgermix

Wesentliche politische Leitplanke und entscheidender Treiber für die Zusammensetzung der zukünftigen Fahrzeugflotte ist die CO₂-Regulierung. Die Studie untersucht in ihrem Basis-Szenario die Auswirkungen des EU-Zieles für Neufahrzeuge von 95 g CO₂/km im Jahr 2020 und eine theoretisch denkbare Fortschreibung auf 70 g CO₂/km im Jahr 2030 und 45 g CO₂/km 2040. In weiteren Szenarien werden moderatere Emissionspfade betrachtet. Bereits im Jahr 2020 bringt ein Zielwert von 95 g CO₂/km hoch effiziente konventionelle Fahrzeuge mit fortschrittlichen Effizienzkomponenten wie z.B. Leichtbau, optimiertem Motormanagement oder Downsizing in die Neuwagenflotte. Gleichzeitig erreichen Hybridfahrzeuge, die aus einer Kombination von elektrischem

und konventionellem Antrieb bestehen, erste substantielle Marktanteile. Sie sind in der Lage, kurze Strecken auch elektrisch zu fahren, und laden ihre Batterien durch die Energierückgewinnung beim Bremsen wieder auf. Für das weiterführende Ziel von 70 g CO₂/km 2030 reichen einfache Parallel-Hybridfahrzeuge nicht mehr aus. Je nach Fahrprofil der Kunden kommen nun Fahrzeuge mit verlängerter Reichweite, Range-Extender sowie Plug-In-Hybride langsam in den Markt. Eine Voraussetzung ist die Nutzung CO₂-armen Stroms. Range-Extender überwinden die Reichweitenbeschränkung der Batterie dadurch, dass eine konventionelle Kraftstoffverbrennung im Fahrzeug Strom erzeugt und mit diesem der Elektromotor betrieben wird. Plug-In-Hybridfahrzeuge können über ein Ladekabel extern aus dem Stromnetz aufgeladen werden und haben zudem in der Regel eine größere Batterie an Bord als ein Parallel-Hybrid. Eine weitere Verschärfung des EU-Ziels auf 45 g CO₂/km im Jahr 2040 führt dazu, dass die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte weiter steigt und sich die Mehrzahl der Neuwagenkäufer für Range-Extender und Plug-In-Hybride entscheiden. Diese fortschrittlichen Hybridvarianten haben einen Benzin- oder Dieselmotor an Bord und können somit den Kundenanspruch einer hohen Reichweite erfüllen. Damit besitzen im Falle einer scharfen CO₂-Regulierung im Jahr 2040 noch 85 Prozent der Neufahrzeuge und 95 Prozent des Fahrzeugbestands einen Verbrennungsmotor. Rein batterieelektrische Antriebe erfüllen die Anforderungen vieler Kundengruppen noch nicht, sind für die Mehrzahl der Kunden unter den angenommenen Rahmenbedingungen zu teuer und bleiben lange Zeit Nischenanwendungen.

Eine strenge Regulierung führt zu Mehrkosten und Steuerausfällen

Für die Mehrzahl der Kunden kann der höhere Anschaffungspreis durch Einsparungen bei Energiekosten durch Effizienz oder Energieträgerwechsel nicht vollständig kompensiert werden. Lernkurven reduzieren die anfangs hohen Kosten der neuen Technologien, trotzdem verbleiben die zukünftigen Mobilitätskosten für den Autofahrer auf einem deutlich höheren Niveau als heute. Unter den getroffenen Annahmen betragen die durchschnittlichen Mehrkosten in den kommenden 30 Jahren je nach Fahrzeugsegment zwischen 22 und 30 Prozent.

Der Verbrauchsrückgang an Mineralölprodukten infolge der ambitionierten Emissionsvorgaben führt im Basis-Szenario zu Steuerausfällen von bis zu 53 Prozent im Jahr 2040. Über den gesamten Analysezeitraum von 2010 bis 2040 entspricht dies einem kumulierten Betrag von über 300 Milliarden Euro. Hierbei ist das erhöhte Mehrwertsteueraufkommen aufgrund gestiegener Fahrzeugpreise für alternative Antriebe und die Besteuerung von Fahrstrom und Wasserstoff im Straßenverkehr diesem potentiellen Steuerausfall nicht gegenübergestellt.

Forschung und Entwicklung sind der Schlüssel zur Kostensenkung

Es kann argumentiert werden, dass Pkw in Zukunft mit einem breiteren Energieträgermix fahren werden, der im Wesentlichen auf Öl und Strom basiert. Eine langfristig angelegte CO₂-Regulierung kann den nötigen Innovationsdruck zur Markteinführung elektrifizierter Antriebskonzepte auslösen. Erhöhte Mobilitätskosten lassen sich unter den Rahmenbedingungen der Emissionsregulierung bei gleichbleibendem Mobilitätsbedarf zwar nicht verhindern, allerdings führen Lerneffekte und der steigende Absatz alternativer Antriebe dazu, dass langfristig diese Mehrkosten wieder sinken. Intensivierte Forschung und Entwicklung im Bereich der alternativen

Antriebskonzepte können deren Kostendegression vorantreiben und somit die Kundenentscheidung zu deren Gunsten unterstützen. Dennoch ist der Pkw-Verkehr noch langfristig auf fossile Kraftstoffe angewiesen, auch um in elektrifizierten Antriebskonzepten mit Unterstützung eines effizienten Verbrennungsmotors die hohen Mobilitätsbedürfnisse der Fahrzeugkunden zu erfüllen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des <i>VECTOR21</i> Modellkonzeptes	11
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Kundenmodellierung in <i>VECTOR21</i>	12
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Auswahlprozesses in <i>VECTOR21</i>	14
Abbildung 4: In der Studie abgebildete Antriebskonzepte (Quelle: Strukturstudie BW ^e mobil)	16
Abbildung 5: Effizienzverbesserung im Verhältnis zu den damit verbundenen Mehrkosten zum Basis Ottoantrieb im mittleren Segment.....	19
Abbildung 6: Angenommene Preise und Kosten eines Lithium-Ionen-Batteriesystems pro kWh	20
Abbildung 7: Übersicht der CO ₂ Regulierungspfade der Szenarien	25
Abbildung 8: Entwicklung der Neufahrzeugflotte im Basis-Szenario in Deutschland bis 2040.....	28
Abbildung 9: Nachfrage der Technologiepakete im mittleren Segment im Rahmen des Marktanteils für Otto und Diesel im Jahr 2010 und 2020 (vgl. S.19).....	29
Abbildung 10: Entwicklung des Flottenbestandes im Basis-Szenario in Deutschland bis 2040	30
Abbildung 11: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Basis-Szenario.	31
Abbildung 12: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen m Basis-Szenario.....	31
Abbildung 13: Auswirkungen auf die Steuereinnahmen im Basis-Szenario in Deutschland bis 2040 (MWSt. beinhaltet nur Kraftstoffabsatz und nicht Fahrzeugverkauf)	32
Abbildung 14: Durchschnittliche Mehrkosten der Pkw-Anschaffung gegenüber Fahrzeugpreis 2010; Summe der variablen Kosten bei einer Haltedauer von sieben Jahren; resultierende Gesamtkosten	33
Abbildung 15: Entwicklung der jährlichen Mobilitätskosten für unterschiedliche Kundentypen (in EUR ₂₀₁₀). *Modellergebnisse, Werte in Grafik gerundet	34
Abbildung 16: Sensitivitätsanalyse für die CO ₂ -Regulierung (Regulierung ab 2020 auf 70 gCO ₂ /km bis 2040)	36
Abbildung 17: Sensitivitätsanalyse für die CO ₂ -Regulierung (Regulierung ab 2020 auf ein konstantes Niveau von 95 g CO ₂ /km bis 2040)	37
Abbildung 18: Einfluss der CO ₂ -Regulierung auf das Kaufverhalten und die Mobilitätskostenerhöhung (relative Veränderung in % zum Basisjahr 2010) der typischen „Otto-PKW Fahrer“ mit Jahresfahrleistung von 12.300 km in 2030.....	37
Abbildung 19: Auswirkungen eines hohen Ölpreises auf Neufahrzeugzulassungen.....	39

Abbildung 20: Kumulierte Differenz der Neuzulassungen für einen höheren Ölpreis gegenüber dem Basis-Szenario.....39

Abbildung 21: Auswirkung einer erhöhten CNG-Tankstellenauslastung zusätzlich zu den Maßnahmen des CNG Szenarios auf die Neuzulassungen.....40

Abbildung 22: Kumulierte Differenz der Neuzulassungen bei höherer CNG-Tankstellenauslastung gegenüber dem Basis-Szenario.....40

Abbildung 23: Auswirkungen von Wasserstoffinfrastruktur (100%Verfügbarkeit) auf Neufahrzeugzulassungen..... 41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakterisierung von Konzepten zum Anschluss ans Stromnetz: Technik und Vor- und Nachteile (Bildquellen: <http://www.hybrid-elektrofahrzeuge.de>; www.nissan-zeroemission.com).....18

Tabelle 2: Im Basis-Szenario verwendete Preise fossiler Energieträger (basierend auf (IEA, 2012))....22

Tabelle 3: In der Studie verwendete Preise und CO₂-Intensitäten für Elektrizität (basierend auf (BMU, 2012))..... 23

Tabelle 4: Massenspezifische CO₂-Grenzwerte differenziert nach Fahrzeugsegmenten für die deutsche Neufahrzeugflotte im Basis-Szenario.24

Tabelle 5: Übersicht der Abgrenzung der in der Studie betrachteten Szenarien 26

Tabelle 6: Neuzulassungszahlen im Basis-Szenario (in Tsd.).....28

Tabelle 7: Die Rahmenannahmen für Energiepreise, Emissionsintensitäten und -regulierung..... 46

Tabelle 8: Die Fahrzeugdimensionierung der elektrifizierten Antriebskonzepte..... 46

Tabelle 9:Auszug Technologiedatenbank mit differenzierten Effizienzpaketen (Beispiel für Mittelsegment, Ottomotor)47

Tabelle 10: Identifikation der durchschnittlichen Fahrertypen..... 47

Tabelle 11: Neuzulassungszahlen in den alternativen Szenarien (in Mio.) 48

Abkürzungsverzeichnis

bbI	Barrel
BEV	Battery Electric Vehicle
B7	Biodiesel (7% vol.) Diesel (93%) Mix
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
E10	Ethanol (10% vol.) Benzin (90% vol.) Mix
EEV	Endenergieverbrauch
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug
HEV	Hybrid Electric Vehicle (parallel)
H ₂	Wasserstoff
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
Kfz	Kraftfahrzeug
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LPG	Autogas (Liquefied Petroleum Gas)
Mio	Million
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie
MwSt	Mehrwertsteuer
MWV	Mineralölwirtschaftsverband
NEFZ	Neuen Europäischen Fahrzyklus
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
Pkw	Personenkraftwagen
RCO	Relevant Cost of Ownership
REEV	Range Extended Electric Vehicle
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas
Tsd	Tausend
TTW	Tank to Wheel
VECTOR ₂₁	Vehicle Technologies Scenario Model
WTT	Well to Tank
WTW	Well to Wheel

1. Einführung

Die Bundesregierung unterstreicht in ihrer Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie den Beitrag des Verkehrssektors an ihren ambitionierten Klimaschutz- und Effizienzzielen für das gesamte Energiesystem (BMVBS, 2013). Andererseits ist individuelle Mobilität für alle Bevölkerungsschichten Ausdruck persönlicher Freiheit und für viele Menschen tägliche Notwendigkeit. Da Klimaschutz im Verkehr sehr wahrscheinlich mit erhöhten Kosten einhergeht, müssen Vor- und Nachteile aller Antriebsformen und Energieträger sorgfältig abgewogen werden, um der hohen Bedeutung und Emotionalität des Themas gerecht zu werden, und Mobilität für alle bezahlbar bleibt.

In diesem Spannungsfeld ist es das Ziel dieser Studie, die mögliche Entwicklung des deutschen Pkw-Marktes und die damit verbundenen Auswirkungen aus Kundenperspektive zu untersuchen. Die Kundenperspektive wird mit Hilfe des DLR-Modells *VECTOR21*, in welchem die Kaufentscheidung des Kunden im Mittelpunkt steht, umgesetzt. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass die heutigen Mobilitätsbedürfnisse der Kunden auch in Zukunft erfüllt werden. Auf Verhaltensänderungen und Verkehrsträgerwechsel wird bewusst verzichtet, um die Auswirkungen einer veränderten Fahrzeugflotte infolge der unterstellten CO₂-Regulierung und Kostenparameter deutlich zu machen.

Anhand verschiedener Szenarien wird der mögliche Einfluss regulatorischer Handlungsoptionen und Parametervariationen auf die Zusammensetzung der Neufahrzeugflotte, den Endenergieverbrauch und die Mobilitätskosten untersucht. Mit der Szenarioauswahl wird keine Aussage darüber getroffen, wie wahrscheinlich oder wünschenswert es ist, dass diese Entwicklungen tatsächlich eintreten (keine Prognose). Die Studienergebnisse liefern vielmehr Entscheidungshilfen, welche CO₂-Vorgaben realistisch erreicht werden können, welche Antriebskonzepte dazu wesentlich beitragen und wie sich politisch induzierte Veränderungen in der Neuwagenflotte für die Fahrzeugkunden auswirken.

2. Herangehensweise

Die vorliegende Studie untersucht im Rahmen von Szenarien die Entwicklung des Pkw-Marktes bis zum Jahr 2040 und stützt sich dabei auf das DLR-Simulationsmodell *VECTOR21* (Mock, 2010). Als besonderes Merkmal des Modells steht der Kunde mit seiner Kaufentscheidung im Mittelpunkt. Er entscheidet, welches Fahrzeug er kauft und damit, wie die Fahrzeugflotte in Zukunft aussehen wird. Diese Kundenperspektive ermöglicht eine realitätsnahe Simulation der zukünftigen Marktentwicklung verschiedener Antriebstechnologien und Energieträger. Um einen Rahmen der möglichen Entwicklung des zukünftigen Neufahrzeugmarktes abzustecken werden die Eingangsparameter des Modells in verschiedenen Szenarien variiert. Im Anschluss werden die Ergebnisse und detaillierten Auswertungen der verschiedenen Szenarien mit dem Basis-Szenario verglichen. In einer Szenario-Auswertung werden relevante Kundengruppen identifiziert, für welche die Veränderungen der Mobilitätskosten detaillierter analysiert werden.

2.1 Szenario Modell *VECTOR21*

Das agentenbasierte Modell *VECTOR21* (Vehicle Technologies Scenario Model) simuliert die Konkurrenzsituation zwischen konventionellen Fahrzeugen und alternativen Antriebskonzepten auf dem Neufahrzeugmarkt. Hierzu werden die verfügbaren Fahrzeuge den Kundenanforderungen in einem szenarioabhängigen Marktumfeld gegenübergestellt. Auf Basis eines Lebenszykluskostenansatzes wird für 900 Kundentypen das günstigste und gleichzeitig emissionsärmste Fahrzeug ermittelt (Abbildung 1).

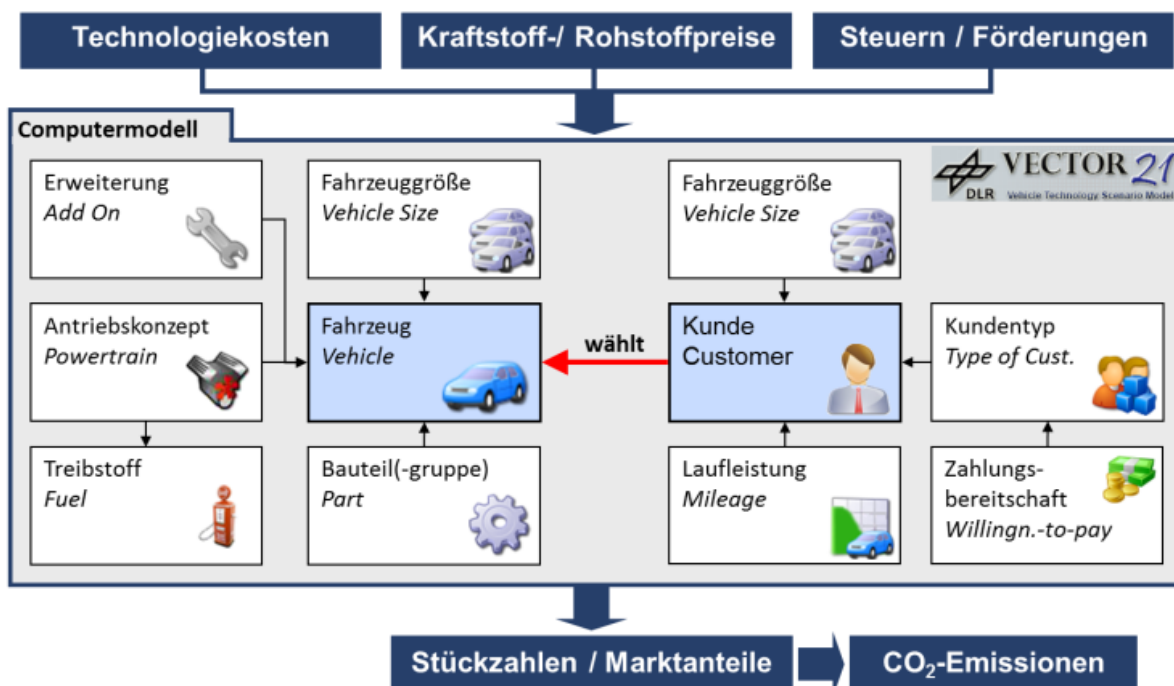


Abbildung 1: Schematische Darstellung des *VECTOR21* Modellkonzeptes

Alle derzeit diskutierten Antriebsstrangkonzepete sind in dem Modell abgebildet. So lassen sich beispielsweise Technologiepakete mit unterschiedlichen Effizienzgraden bei konventionellen Antrieben konfigurieren. Im Hinblick auf zukünftige elektrifizierte Fahrzeugkonzepte können u.a. unterschiedliche Batteriegrößen sowie Leistungsgrößen von elektrischen Maschinen oder auch Brennstoffzellensystemen variiert werden. Als Datenbasis für historische Größen des Neufahrzeugmarktes dienen statistische Daten aus Veröffentlichungen des Kraftfahrtbundesamtes, dem „Transport Emissions Model“ (IFEU, 2012), sowie der „Conservation of Clean Air and Water in Europe“-Initiative (JRC, 2011).

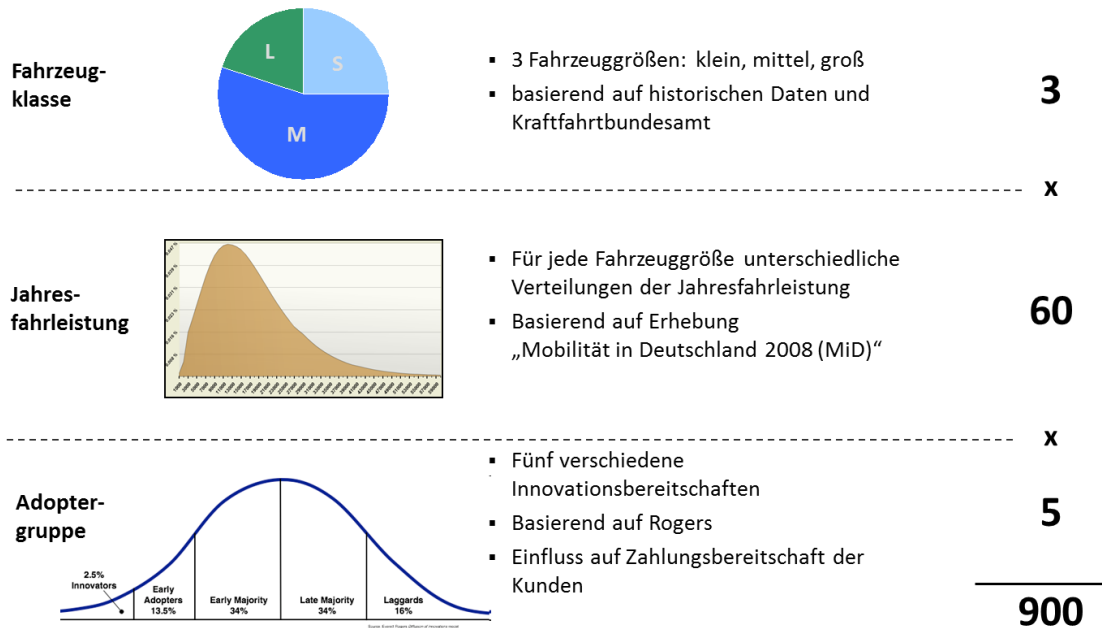


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Kundenmodellierung in VECTOR21

Die Fahrzeuge werden basierend auf historischen Daten und Informationen des Kraftfahrtbundesamtes in drei Fahrzeugklassen (klein, mittel, groß) unterschieden. Zur übersichtlichen Darstellung werden hierfür die KBA-Segmente zusammengefasst. Typische Vertreter der kleinen Fahrzeugklasse sind z.B. der VW Up, Smart Fortwo, VW Polo, oder Opel Corsa. Im mittleren Segment sind dies der VW Golf, VW Passat und BMW 3er. Das große Segment bilden die obere Mittelklasse, die Oberklasse, SUV und Vans.

Die Jahresfahrleistungen sind spezifisch je Fahrzeuggröße in 60 Gruppen (in 1.000-km-Schritten) aufgeteilt. Diese Verteilung basiert auf der Studie „Mobilität in Deutschland“ (DLR & infas, 2008).

Die Kunden werden nach Fahrzeugklasse, Jahresfahrleistung und *Adoptergruppe* differenziert. Die Adoptergruppe ist in fünf Typen unterteilt (*Innovators*, *Early Adopters*, *Early Majority*, *Late Majority* und *Laggards*) (Rogers, 1995), die jeweils unterschiedliche Zahlungsbereitschaften mitbringen. Damit werden 900 Kundentypen definiert (siehe Abbildung 2). Das Spektrum reicht vom „Innovator“, der neuen Antriebstechnologien gegenüber besonders aufgeschlossen ist und eine vergleichsweise hohe Aufpreisbereitschaft (bis zu 10%) mitbringt, bis hin zum „Laggard“ (Nachzügler), der nicht bereit ist, einen Aufpreis hinzunehmen.

Die im Modell hinterlegten Kosten der jeweiligen Fahrzeugtechnologien basieren auf vorangegangenen Analysen und wurden in der Vergangenheit in Zusammenarbeit mit Vertretern der Automobil- und Zulieferindustrie kontinuierlich aktualisiert. Fahrzeuge werden über sämtliche technischen Eigenschaften (z.B. Energieinhalt der Batterie, Leistung der Elektromaschine etc.) auf Komponentenebene im Modell zusammengestellt. Somit ergeben sich dynamische Anschaffungskosten, die sich je nach Szenario-Verlauf signifikant unterscheiden können. Um den politischen Einflussfaktoren Rechnung zu tragen, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge, szenarioabhängige Steuern und gegebenenfalls Subventionen zu definieren.

Variable Kosten werden in *VECTOR21* in Abhängigkeit der 900 verschiedenen Kundentypen definiert. Haupteinflussfaktor auf die variablen Kosten sind, neben den jährlich zu entrichtenden Steuern, die Kosten für Energieträger. Diese Kosten sind szenarioabhängig definiert und stützen sich auf den hinterlegten Ölpreis sowie die im Szenario angenommenen Erzeugungsketten für Elektrizität und Wasserstoff. Kombiniert mit der jährlichen Fahrleistung der Nutzer und dem Energiebedarf des jeweiligen Antriebskonzeptes ergeben sich so für jeden Kundentyp und für jedes Fahrzeug individuelle variable Kosten.

Um die fortschreitenden technischen Entwicklung einzubeziehen, besteht die Möglichkeit Kraftstoffsparsoptionen für die jeweiligen Fahrzeuge zu definieren. Hierdurch werden den Kundengruppen Auswahloptionen eröffnet, die auf der einen Seite mit Mehrkosten bei der Anschaffung verbunden sind, auf der anderen Seite aber auch eine Reduktionen des Energieverbrauchs (und der Emissionen) bedingen. Letztlich wird die Situation auf dem Neufahrzeugmarkt dadurch realistisch abgebildet.

Fahrzeugwahl des Kunden

Der Entscheidungsalgorithmus von *VECTOR21* bezieht alle genannten Charakteristiken ein und ermittelt daraus einen Fahrzeugpool, der den Kunden zur Auswahl steht (Schritt 0, siehe Abbildung 3). Es folgt der Auswahlprozess, der in drei Schritten vollzogen wird. Im ersten Schritt werden Fahrzeugklasse und Grundanforderungen abgeglichen. Außerdem überprüft das Modell, welches Fahrzeug die Infrastrukturbedürfnisse des Kundentyps erfüllt. Hierzu ist für jeden Energieträger in Abhängigkeit des Antriebskonzeptes eine Infrastrukturverfügbarkeit hinterlegt (siehe auch S.41). Im zweiten Schritt werden die *Relevant Cost of Ownership* (RCO) berechnet, und die Fahrzeuge mit den RCO identifiziert, die innerhalb der Zahlungsbereitschaft des jeweiligen Kunden liegen. Bei den RCO handelt es sich um eine Vereinfachung des *Total Cost of Ownership* (TCO) Konzeptes, welches alle bei Fahrzeugkauf und Nutzung anfallenden Kosten aus Kundensicht umfasst. Die RCO umfassen lediglich einmalige Fixkosten (Anschaffung), jährliche Fixkosten (Kfz-Steuer) und fahrleistungsabhängige variable Kosten (Kraftstoffkosten). Analysen zum Kaufverhalten zeigen, dass dieser vereinfachte RCO-Ansatz das Kundenverhalten bei der Antriebswahl hinreichend genau abbildet¹. Diejenigen Fahrzeuge, die

¹ Andere Einflussgrößen auf die Mobilitätskosten, wie Parkgebühren, Winterreifen etc. sind für die Kunden bei der Antriebswahl in der Regel irrelevant und werden im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt.

höhere Kosten aufweisen als die Zahlungsbereitschaft der jeweiligen Kundentypen, sind ausgeklammert. Im letzten Schritt wird aus den in Frage kommenden Fahrzeugen das Fahrzeug mit den geringsten *Well-to-Wheel*-Emissionen ausgewählt. Das Ergebnis ist die Marktzusammensetzung der zukünftigen Neufahrzeugflotte.²

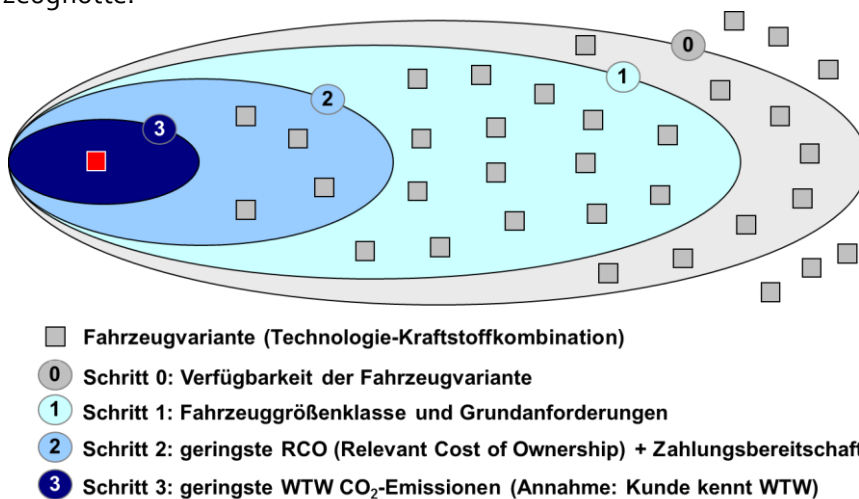


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Auswahlprozesses in VECTOR₂₁

Gleichwohl können einzelne dieser Faktoren in Zukunft an Bedeutung gewinnen. So wird derzeit beispielsweise innerhalb der Bundesregierung über Privilegien für die Elektromobilität wie freies Parken diskutiert (GGEMO, 2012).

² Für eine detaillierte Beschreibung von VECTOR₂₁ vgl. (Mock, 2010).

3. Rahmendaten und Szenarienaufbau

3.1 Einflussfaktoren

Die auf den Neufahrzeugmarkt einfließenden Faktoren lassen sich in ökonomische und regulatorische Faktoren differenzieren. Im Sinne einer konsistenten Szenario-Entwicklung sind diese stets als Bündel zu betrachten. Zu den ökonomischen Faktoren zählen insbesondere die Bruttopreise der verschiedenen Energieträger (Öl, Erdgas, Strom, Wasserstoff), die im Wesentlichen die variablen Kosten einer Antriebsform bestimmen. Die Kosten einzelner Antriebstechnologien haben wiederum eine wesentliche Bedeutung für den Anschaffungspreis bestimmter Fahrzeugtypen. Dazu zählen z.B. die Kosten für verschiedene Technologie- bzw. Effizienzpakete in konventionellen Fahrzeugen. Die Batteriekosten für elektrische Antriebe folgen einer Lernkurve, so dass die Kostenkurve in Abhängigkeit des Fahrzeugabsatzes endogen im Modell bestimmt wird. Zudem fließen die Aufwendungen für den Auf- und Ausbau einer Tankstellen- bzw. Ladeinfrastruktur als ökonomischer Faktor in das Szenario ein. Ein wichtiger regulatorischer Faktor ist der CO₂-Grenzwert. Er gilt als Treiber der zukünftigen Entwicklung der Neuwagenflotte. Hinzu kommt die Steuergesetzgebung, die einerseits zur Finanzierung des Staatshaushaltes wichtige Beiträge leistet und andererseits für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Antriebsform von großer Bedeutung ist. Für die Gestaltung des Szenarios werden unterschiedliche Produktionspfade von Energieträgern bzw. Kraftstoffen berücksichtigt und sowohl unterschiedliche Produktionskosten als auch die je nach Produktionspfad variierenden CO₂-Intensitäten einbezogen (siehe Tabelle 7 im Anhang).

3.2 Betrachtete Antriebskonzepte

Neben den auf dem deutschen Fahrzeugmarkt etablierten Antrieben (Otto, Diesel) sind in dieser Studie auch alternative Antriebskonzepte betrachtet worden. Hierzu zählen Erdgasfahrzeuge (CNG), die Parallel-Hybride (HEV) und Plug-In Hybride (PHEV) sowie als serieller Hybrid der Range-Extender (REEV), Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) (Abbildung 4).

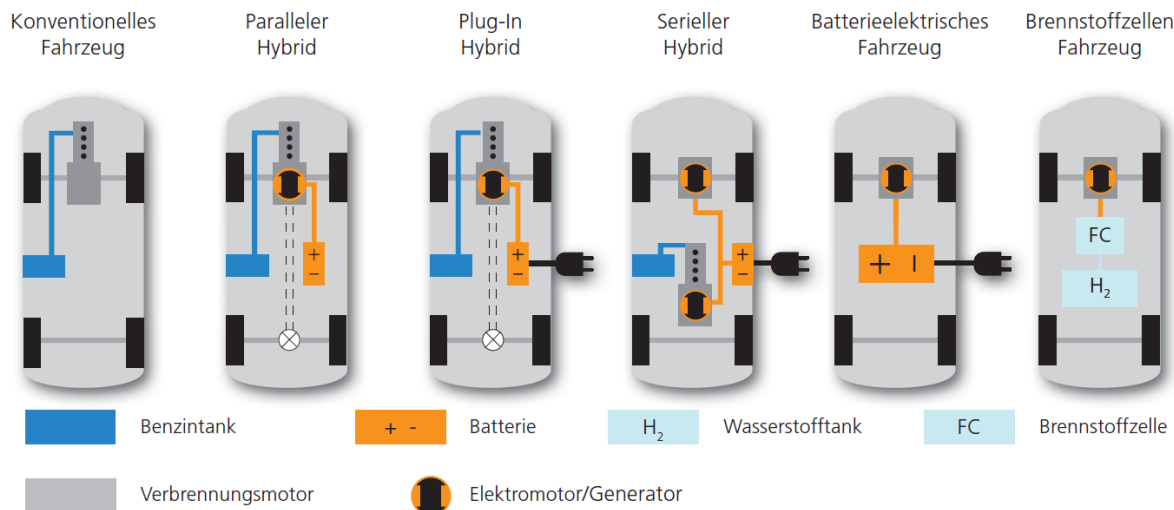


Abbildung 4: In der Studie verwendete Antriebskonzepte (Abbildung: Strukturstudie BW^e mobil)

Bei CNG-Fahrzeugen handelt es sich um Antriebskonzepte mit Ottomotoren, welche mit der erforderlichen Technik wie einem Druckgasbehälter, einem Druckregler, geeigneten Einspritz- und Rückschlagventilen sowie einer geeigneten elektronischen Motorsteuerung ausgestattet sind. Man unterscheidet hierbei zwischen mono- und bivalenten Antriebskonzepten. Bei Letzteren besteht die Möglichkeit, den Verbrennungsmotor mit Benzin oder CNG zu betreiben. Durch Betätigen eines Schalters oder auch automatisch kann der Betrieb zwischen den beiden Kraftstoffen gewechselt werden. Bei den derzeit auf dem Markt vertretenen Pkw handelt es sich fast ausschließlich um bivalente Antriebskonzepte. Monovalente Antriebskonzepte bieten lediglich die Möglichkeit der Betankung durch einen Kraftstoff (bspw. herkömmliche Benzin- und Dieselfahrzeuge). Die Abgrenzung der beiden Konzepte verschwimmt allerdings, da auch Erdgasfahrzeuge die mit einem Reservetank für Benzin ausgestattet sind, als monovalent oder quasi-monovalent (z.B. VW eco up!) bezeichnet werden (erdgas mobil, 2013).

Die heute mit Abstand am weitesten verbreitete Alternative zu Benzin- und Dieselfahrzeugen stellt LPG (Autogas) dar. Da es sich bei LPG jedoch im Wesentlichen um einen Nachrüstermarkt handelt und im Rahmen dieser Studie lediglich die Neufahrzeugflotte betrachtet wird, ist der Einfluss von LPG auf die Neuwagenflotte nicht vollständig darstellbar. Im Rahmen dieser Studie wird daher auf eine explizite Berechnung der LPG-Anteile verzichtet. Potenzielle LPG-Fahrzeuge sind folglich im Marktanteil der Benziner enthalten.

Der HEV wird im Wesentlichen durch den an Bord befindlichen Verbrennungsmotor konventionell angetrieben. Zusätzlich kann er kurze Strecken auch elektrisch fahren und seine Batterien durch die Energierückgewinnung beim Bremsen wieder aufladen. Im BEV wird die zum Antrieb benötigte me-

chanische Energie durch einen Elektromotor gewandelt. Die elektrische Energie wird in der Traktionsbatterie im Fahrzeug mitgeführt, die beim Anschluss an das Stromnetz wieder aufgeladen wird. Bei PHEV und REEV handelt sich um eine Mischung aus BEV und HEV, welche sich in ihrer Auslegung unterscheiden. Diese Fahrzeugkonzepte überwinden die Reichweitenbeschränkung ihrer Batterie, indem auf eine konventionelle Energiewandlung durch Kraftstoffverbrennung zurückgegriffen wird. Im REEV wird hierdurch elektrische Energie erzeugt mit welcher ein Elektromotor betrieben wird. Im PHEV ist der Verbrennungsmotor mechanisch an die Räder gekoppelt und treibt diese an. Beiden gemeinsam ist die Möglichkeit, über ein Ladekabel extern aus dem Stromnetz aufgeladen zu werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die betrachteten elektrifizierten Antriebskonzepte.

Jedes Antriebskonzept setzt sich aus einzelnen Komponenten zusammen, die je nach Segment und Konzept dimensioniert sind. So verfügen alle elektrifizierten Antriebskonzepte beispielsweise über eine Lithium-Ionen-Batterie. In einem kleinen HEV ist diese mit 1 kWh ausgelegt, in einem BEV im mittleren Segment mit 25 kWh.

Tabelle 8 im Anhang gibt einen Überblick über die Dimensionierung der elektrifizierten Antriebskonzepte. Die Verbrauchswerte werden durch die Simulation aller Antriebskonzepte entsprechend ihrer Dimensionierung im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermittelt³.

³ Die Simulation der Antriebskonzepte wird in (Hülsebusch, et al., 2009) und (Redelbach, et al., 2012) näher beschrieben.

Tabelle 1: Charakterisierung von Konzepten zum Anschluss ans Stromnetz: Technik und Vor- und Nachteile (Bildquellen: <http://www.hybrid-elektrofahrzeuge.de>; www.nissan-zeroemission.com)

Systembild	Technik	Vor-/Nachteile	Beispiel
Paralleler Hybrid 	Start-Stopp, Rekuperation, kurzes elektrisches Fahren Spannung: 200-400 V Elektrische Leistung 30-50 kW Batteriekapazität: 0,6-2 kWh	<ul style="list-style-type: none"> + sehr gute Fahrleistungen, hohes Einsparpotential bei Stadtfahrten, lokal abgasfreies Fahren möglich - hoher technischer und finanzieller Aufwand, hohes Zusatzgewicht 	 Toyota Prius
Batterie 	Rekuperation, rein elektrisches Fahren Spannung: 200-400 V Elektrische Leistung 30-70 kW Batteriekapazität: 10-30 kWh	<ul style="list-style-type: none"> + hohes CO₂ Einsparpotential, insbes. mit erneuerbarem Strom - aufgrund der Batteriekosten heute relativ teuer im Vgl. zu konventionellem Fahrzeug; beschränkte Reichweite 	 Nissan Leaf
Range-Extender 	Rekuperation, rein elektrisches Fahren, autonome Stromversorgung aus Kraftstoff Spannung: 200-400 V Elektrische Leistung 30-70 kW Motorische Leistung Batteriekapazität: 10-30 kWh	<ul style="list-style-type: none"> + hohes CO₂ Einsparpotential, insbes. mit erneuerbarem Strom; keine Reichweitenbeschränkung; Kostenreduktion durch Einsparung bei Batteriekosten - Mehrgewicht, Packagingprobleme, Kosten durch Range-extender-System 	 Opel Ampera
Plug-In Hybrid 	Start-Stopp, Rekuperation, längeres elektrisches Fahren Spannung: 200-400 V Elektrische Leistung 30-50 kW Batteriekapazität: 5-15 kWh	<ul style="list-style-type: none"> + sehr gute Fahrleistungen, hohe CO₂-Reduktion bei Stadtfahrten, lokal abgasfreies Fahren möglich - hoher technischer und finanzieller Aufwand, hohes Zusatzgewicht 	 Toyota Prius Plug-In

3.3 Technologisches CO₂-Reduktionspotential und Kostenentwicklung

Die zuvor beschriebenen Antriebstechnologien unterliegen einer Effizienzverbesserung, die sich auf den Kraftstoffverbrauch der im Modell verwendeten Fahrzeuge auswirkt. Somit ergeben sich ebenfalls Veränderungen im Emissionsverhalten und in der Kostenkalkulation der Antriebskonzepte, was letztendlich wieder die Kaufentscheidung der Modellkunden beeinflusst.

Die Verbesserung der Antriebstechnologien ist durch Technologiepakete implementiert. In diesen ist eine Vielzahl von technologischen Verbesserungsmaßnahmen zusammengefasst. Diese reichen von bereits heute verbreiteten Technologien wie Leichtlaufreifen über motorische Verbesserungen wie der automatischen Zylinderabschaltung bis zu ambitionierten Leichtbaumaßnahmen zur Gewichtsreduktion. Mit jeder der hinterlegten Technologien sind ein Effizienzverbesserungsfaktor und ein Kostenfaktor verbunden⁴. Hierdurch vervielfältigt sich die Auswahl der möglichen Fahrzeugkonzepte für den Modellkunden. Abbildung 5 illustriert das Verhältnis der Kosten- und Effizienzentwicklung der Technologiepakete am Beispiel des Ottoantriebes und Otto-Parallel-Hybrides im mittleren Segment. Die detaillierten Addon-Technologien in den Effizienzpaketen und entsprechende Kosten sind beispielhaft in Tabelle 9 (für Mittelsegment Ottomotor) im Anhang dargestellt.

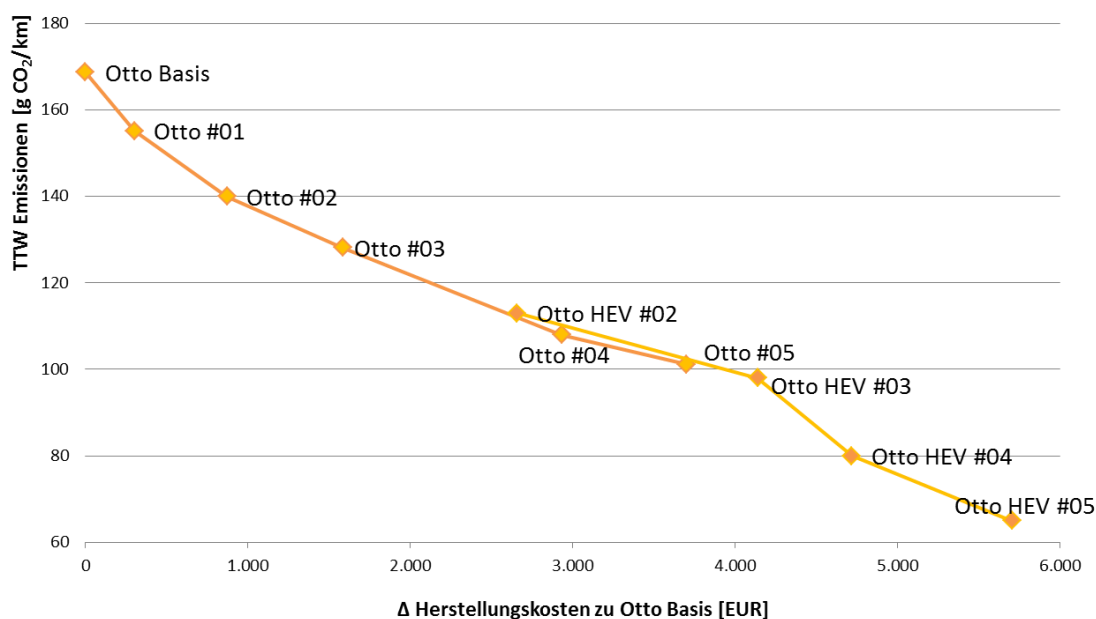


Abbildung 5: Effizienzverbesserung im Verhältnis zu den damit verbundenen Mehrkosten zum Basis Ottoantrieb im mittleren Segment

Die Batteriekostenentwicklung folgt einer Lernkurve, nach der die Produktionskosten für Lithium-Ionen-Batterien abhängig von der abgesetzten Stückzahl modellendogen kalkuliert werden. Dabei wird unterstellt, dass alle elektrifizierten Antriebskonzepte das gleiche Batteriesystem nutzen und sich ihre Traktionsbatterien lediglich in ihrer Kapazität unterscheiden. Durch den Einbezug einer Marge, die auf die Produktionskosten aufgeschlagen wird, kann die Annahme eines anfänglichen

⁴ Der prinzipielle Aufbau der Technologiepakete ist in (Mock, 2010) beschrieben.

wirtschaftlichen Verlustes bei der Batterieproduktion in der Kalkulation der Batteriepreise berücksichtigt werden. Um die Markteinführung elektrifizierter Antriebskonzepte zu erleichtern, wird angenommen, dass Hersteller diesen Verlust hinnehmen und durch langfristige Gewinne ausgleichen können. Das Verhältnis der Kosten- und Preisentwicklung der Lithium-Ionen-Batterien (auf Systemebene) ist in Abbildung 6 dargestellt.

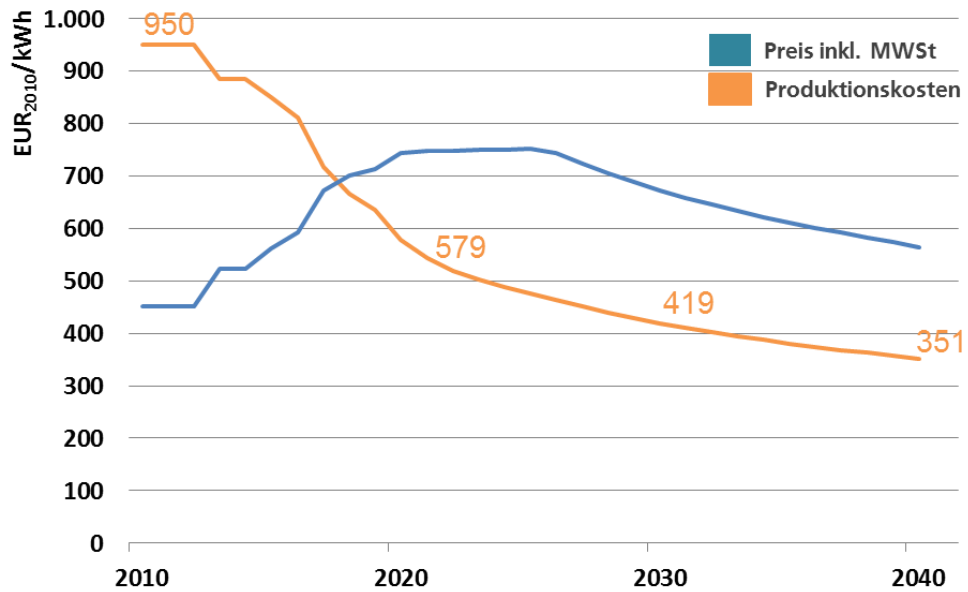


Abbildung 6: Angenommene Preise und Kosten eines Lithium-Ionen-Batteriesystems pro kWh

3.4 Konventionelle Kraftstoffe

Benzin und Diesel

Grundlage zur Berechnung der Preise von konventionellen Flüssigkraftstoffen im Basis-Szenario ist der Ölpreisfad des „*New Policies Scenario*“ des World Energy Outlooks 2012 der Internationalen Energieagentur (IEA). Im Modell werden aus diesem exogen vorgegebenen Ölpreisfad für jeden simulierten Zeitschritt die Produktpreise für Benzin und Diesel berechnet. Die Berechnung erfolgt über eine mathematische Funktion, die aus der Regression historischer Öl- und Kraftstoffpreise ermittelt wurde. Für den endgültigen Tankstellenpreis wird in einem weiteren Schritt die derzeitige Mineralöl- und Mehrwertsteuer auf die Produktpreise aufgeschlagen. Hierbei erfolgt die Annahme, dass die Steuersätze über den Betrachtungszeitraum (als reale Werte) konstant bleiben. Für die Verfügbarkeit der Infrastruktur für beide Kraftstoffe wird für den gesamten Betrachtungszeitraum eine vollständige Abdeckung angenommen. Im Rahmen eines Alternativszenarios wird zusätzlich ein höherer Ölpreisfad betrachtet, der sich am „*Current Policies Szenario*“ des WEO 2012 der IEA orientiert (siehe S. 39).

Um die Reduktion der CO₂-Intensität von Benzin und Diesel infolge der zunehmenden Beimischung von Biokraftstoffen korrekt abzubilden, werden diese als Blend mit einem entsprechenden Beimischungsanteil im Modell hinterlegt. Die Beimischungsquote ist für die Modellierung auf den gesamten Kraftstoffabsatz übertragen. Es wird unterstellt, dass auf dem deutschen Markt langfristig keine sogenannten *FlexFuel* Fahrzeuge nachgefragt werden, welche aufgrund motorischer Anpassungen in der Lage sind, Kraftstoffe mit höherer Beimischungsquote zu tanken. Daher ist die biogene Beimischung für Benzin langfristig auf 6,72% (energetisch, entspricht E10) begrenzt (Studienergebnis auf Basis (FNR, 2013) und (UFOP, 2012)). Für Diesel ist ein maximaler biogener Anteil von 6,4% (energetisch, entspricht B7) vorgesehen (Studienergebnis auf Basis von (FNR, 2013) und (UFOP, 2012)). Die Produktionskosten des biogenen Beimischungsanteils fließen implizit in die Kostenkalkulation des Kraftstoffgemisches ein.

Erdgas

Derzeit kommt Erdgas in komprimierter Form (200 bar) als Energieträger im Straßenverkehr zum Einsatz. Die Produktionskosten für Erdgas als Kraftstoff wurden auf Basis der Entwicklung des Ölpreises berechnet. Hinzu kommen Netznutzungsentgelt, Energiesteuer und Mehrwertsteuer (BDEW, 2011). Für das Basis-Szenario wird angenommen, dass entsprechend dem aktuellen Gesetzesrahmen der reduzierte Energiesteuersatz zum 01.01.2019 ausläuft. Damit erhöht sich die Energiesteuer von 0,19 EUR/kg CNG auf 0,44 EUR/kg CNG. Zusätzlich zu den Steuern und Abgaben wird eine Umlage der Kosten für den Infrastrukturausbau einschließlich marktüblicher Margenbedürfnisse von Betreibern und Pächtern berücksichtigt. Dieser wird unter den gegenwärtigen Bedingungen nach Schätzung des MWV mit 0,59 EUR/kg CNG beziffert. Dabei ist die aktuelle Zahl der Erdgastankstellen mit einem Wachstum von 5% linear fortgeschrieben worden, d.h. ca. 1400 CNG-Tankstellen im Jahr 2020, ca. 2400 im Jahr 2030 und ca. 3800 im Jahr 2040.

Infolge des geringeren Kohlenstoffgehaltes fallen im Vergleich zu Benzin und Diesel 25% niedrigere CO₂-Emissionen an (JRC, 2011), die durch die Beimischung von Biogas weiter reduziert werden können. Die Biomethaneinspeisung (biogener Anteil am Gesamterdgasverbrauch) für Deutschland wird langfristig auf 5% geschätzt⁵. Im Jahr 2010 lag dieser Wert bei ca. 0,3% entsprechend der Biomethaneinspeisung von 6,5 PJ (Bundesnetzagentur, 2012) bei einem Gesamterdgasverbrauch von 2.247 PJ (AG-Energiebilanzen, 2012). Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass der Biomethananteil gleichmäßig auf die verschiedenen Verbrauchssektoren verteilt ist.

Im Rahmen eines Alternativszenarios werden die genannten Parameter zugunsten einer progressiveren Entwicklung der Erdgasmobilität verändert (siehe S. 25).

Tabelle 2: Im Basis-Szenario verwendete Preise fossiler Energieträger (basierend auf (IEA, 2012)).

	Einheit	2010	2020	2030	2040
Rohöl	USD ₂₀₁₁ /bbl	108 (2011)	120	124	126
Benzin	EUR ₂₀₁₀ /l	1,46	1,53	1,55	1,57
Diesel	EUR ₂₀₁₀ /l	1,36	1,44	1,46	1,48
Erdgas	EUR ₂₀₁₀ /kg	1,01	1,20	1,22	1,25

3.5 Elektrizität und Elektromobilität

Die Entwicklung der Preise und CO₂-Intensität des Energieträgers Strom stützen sich auf das Szenario C der Leitstudie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU, 2012). Ausgehend von den Zielvorgaben des Energiekonzepts der Bundesregierung unterstellt das BMU-Szenario, dass sich die Emissionsintensität des deutschen Strom-Mix von derzeit 540 g CO₂ Äqu./kWh auf 94 g CO₂ Äqu./kWh reduziert. Im Rahmen dieser Studie wird diese Emissionsintensität auch für die Elektromobilität verwendet. Für die Strompreisbildung werden die üblichen Steuern und Abgaben für Haushaltskunden auf die Gestehungsvollkosten aufgeschlagen (Netznutzungsentgelt, Stromsteuer, KWK-Umlage, Konzessionsabgabe, Mehrwertsteuer und EEG-Umlage). Eine spezielle Steuer auf in der Elektromobilität nachgefragten Strom („Fahrstrom“) wird nicht berücksichtigt.

Zudem werden die Kosten für den Ausbau und die Instandhaltung einer künftigen Infrastruktur für Elektrofahrzeuge ab dem Jahr 2020 auf den Strompreis umgelegt. Basis hierfür ist ein abgeschätzter kumulierter Strombedarf von 256 TWh für den Zeitraum von 2012-2040. Die durchschnittlichen Kosten der Ladepunkte sind durch eine Meta-Analyse hierzu existierender Literatur und in einer Umfrage von Herstellern für Elektroladeinfrastruktur ermittelt worden. Ein Ladepunkt ist als Installation defi-

⁵ Laut (IER, et al., 2012) liegt der biogene Anteil im Erdgasnetz Baden-Württembergs langfristig zwischen 4% und 10%, wobei dem unteren Rand der Bandbreite eine realistische Bewertung der Flächenverfügbarkeit zu Grunde liegt. Daher wird im Rahmen der vorliegenden Studie eine Obergrenze für die Biomethaneinspeisung von 5% verwendet.

niert, an welcher ein Elektrofahrzeug pro Zeiteinheit geladen werden kann. D.h. eine Ladestation kann mehrere Ladepunkte umfassen. Für einen privaten Ladepunkt belaufen sich die Kosten auf 1.512 EUR für den Zeitraum 2010-2040. Für einen öffentlichen Ladepunkt fallen im gleichen Zeitraum durchschnittlich 2.306 EUR an. Die Kosten für Installation, Wartung und Instandhaltung eines öffentlichen Ladepunktes sind durch einen Aufschlag von 100% berücksichtigt. Zur Vereinfachung sind nur Ladepunkte nach Typ2 (EU-Standard) betrachtet worden. Schnellladepunkte oder Batteriewechselstationen finden keine Berücksichtigung.

Tabelle 3: In der Studie verwendete Preise und CO₂-Intensitäten für Elektrizität (basierend auf (BMU, 2012)).

	Einheit	2010	2020	2030	2040
Elektrizitätspreis	€ _{t₂₀₁₀} /kWh	20,0	28,4	32,4	33,0
CO ₂ -Intensität	g _{CO₂} /kWh	547	316	198	94

Die Entwicklung der Zahl der Ladepunkte orientiert sich an den Zielen der EU Kommission für Deutschland im Jahr 2020 (EU, 2013), so dass die Zahl der Ladepunkte von derzeit 3819 (BDEW Angabe) auf 1,5 Mio. im Jahr 2020 steigt. Für das Jahr 2040 sind 6 Mio. Ladepunkte angenommen worden. Für die Zeit zwischen 2020 und 2040 ist die Zahl der Ladepunkte linear interpoliert worden. Der Anteil öffentlicher Ladepunkte ist entsprechend (EU, 2013) auf 10% geschätzt worden, d.h. für das Jahr 2040 werden 600.000 öffentliche Ladepunkte angenommen.

Für die Infrastrukturumlage sind die kumulierten Kosten aller Ladepunkte auf den antizipierten Strombedarf der Elektromobilität in Höhe von 256 TWh umgelegt worden. Sie beträgt konstant 4,3 EUR_{t₂₀₁₀}/kWh und wird ab 2020 auf den Strompreis addiert.

3.6 Wasserstoff

Die Eingabe-Parameter des Energieträgers Wasserstoff basieren im Wesentlichen auf der „*Powertrain Coalition Study*“ (McKinsey, 2012). Bei dieser handelt es sich um die derzeit einzige verfügbare Publikation, in welcher der Produktions- und Distributionspfad von Wasserstoff sowohl technisch als auch preislich (inkl. Infrastruktur) konsistent beschrieben sind. Zwar sind einige Parameter infolge der europäischen Ausrichtung der Studie etwa beim Strom-Mix nicht exakt auf deutsche Verhältnisse übertragbar. Die daraus resultierenden Abweichungen können jedoch hinsichtlich ihrer Ergebnisrelevanz im Rahmen dieser Studie vernachlässigt werden. Einzige Korrektur ist die Ergänzung der Mehrwertsteuer, die den Kosten für Wasserstoff zugeschlagen wird. Eine Steuer auf den im Straßenverkehr verwendeten Wasserstoff ist nicht betrachtet worden. Somit entwickelt sich der Tankstellenpreis für Wasserstoff von 7,85 EUR/kg in 2020 auf 5,95 EUR/kg in 2040. Die CO₂-Intensität entwickelt sich im selben Zeitraum von 360 auf 27 g CO_{2-Äqu.}/kWh (im Vergleich: Onshore-Windkraft 10 g CO_{2-Äqu.}/kWh (Weisser, 2007)).

3.7 CO₂-Gesetzgebung

EU-Ziele

Die in das Szenario-Modell eingehenden Parameter zur Begrenzung der CO₂-Emissionen der Neuwagenflotte stützt sich auf die aktuell gültige EU-Verordnung (EU, 2009). In dieser wird ein EU-weites Emissionsziel von 130 g CO₂/km für das Jahr 2015 und 95 g CO₂/km für 2020 festgelegt. Das Ziel bezieht sich auf alle in der EU neuzugelassenen Pkw und leichte Nutzfahrzeuge. Hierbei erfolgt eine Differenzierung der Emissionsvorgabe nach Herstellern, die vor allem das durchschnittliche Flottengewicht berücksichtigt⁶.

Spezifische Ziele für Deutschland

Da im Rahmen dieser Studie der deutsche Fahrzeugmarkt betrachtet wird, müssen die europäischen Emissionsziele angepasst werden. Vereinfachend wird der massenabhängige Korrekturfaktor des EU-Ziels für das individuelle Flottenziel eines Herstellers gemäß EU-Verordnung (EU, 2011) auf die deutsche Flotte angewandt. Damit ist es möglich, jedem Fahrzeugsegment im Modell einen spezifischen CO₂-Zielwert zuzuordnen. Statt des Massendurchschnitts eines Herstellers wird die durchschnittliche Masse jedes Segments (klein, mittel, groß) genutzt. Hieraus ergibt sich für 2015 statt der 130 g CO₂/km beispielsweise ein segmentspezifischer Zielwert von 135 g CO₂/km für das mittlere Segment. Im kleinen Segment beträgt er zum selben Zeitpunkt 118 g CO₂/km und im großen Segment 152 g CO₂/km.

Tabelle 4: Massenspezifische CO₂-Grenzwerte differenziert nach Fahrzeugsegmenten für die deutsche Neufahrzeugflotte im Basis-Szenario⁷.

		2020			2030			2040		
	Einheit	klein	mittel	groß	klein	mittel	groß	klein	mittel	groß
EU-Grenzwert	g/km	95			70			45		
Spezifischer Grenzwert	g/km	83	100	117	58	75	92	33	50	67

⁶ Für die detaillierte Beschreibung dieser Differenzierung wird auf (EU, 2009) und (EU, 2011) verwiesen. Hersteller mit einem geringeren durchschnittlichen Flottengewicht haben einen CO₂-Grenzwert zu erreichen, der unterhalb des europäischen Durchschnittswertes liegt. Hersteller mit einem höheren durchschnittlichen Flottengewicht haben einen CO₂-Grenzwert zu erreichen, der oberhalb des europäischen Durchschnittswertes liegt.

⁷ Die EU-Grenzwerte ab 2020 sind theoretisch denkbare Fortschreibungen. Tatsächliche EU-Grenzwerte sind derzeit nur bis 2020 definiert (siehe Abbildung 7).

3.8 Szenarienaufbau

In der vorliegenden Studie sind sechs Szenarien betrachtet worden. Tabelle 5 illustriert, wie sich diese sechs Szenarien voneinander abgrenzen.

Im Basis-Szenario wird die geltende CO₂-Regulierung im Jahr 2020 linear sinkend auf 45 g CO₂/km im Jahr 2040 fortgeschrieben. Für ein Basis-Szenario handelt es sich um einen ambitionierten Regulierungspfad. Zwei alternative Szenarien haben moderatere regulatorische Anforderungen: 70 g CO₂/km bzw. 95 g CO₂/km im Jahr 2040 (siehe Abbildung 7). In letzterem Szenario wird somit Entwicklung des CO₂-Regulierungspfades ab dem Jahr 2020 eingefroren.

In einem weiteren Szenario wird der Einfluss der Ölpreisentwicklung untersucht. Im Basis-Szenario werden die Kraftstoffe auf Basis des „New Policies Scenario“ der IEA berechnet (vgl. S.21). Das Szenario „Ölpreisvariante“ basiert auf dem „Current Policies Scenario“ der IEA (IEA, 2012), das ein höheres Ölpreisniveau als im Basis-Szenario unterstellt.

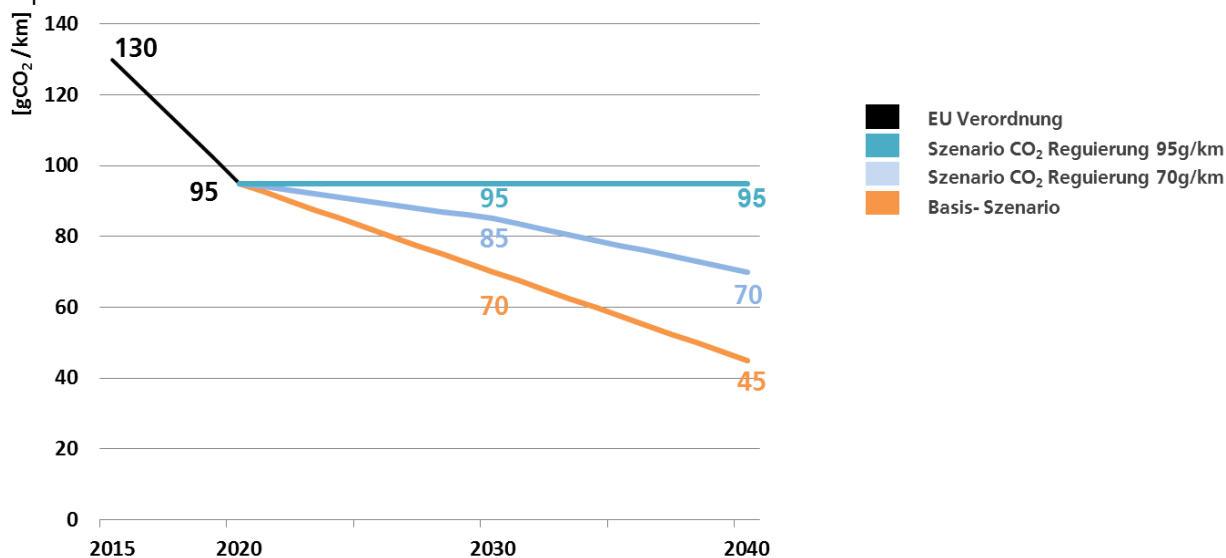


Abbildung 7: Übersicht der CO₂ Regulierungspfade der Szenarien

Ob sich Erdgasfahrzeuge mittels progressiverer Rahmenbedingungen im Markt substantiell durchsetzen können, wird im Szenario „Erdgas“ analysiert. Im Gegensatz zum Basis-Szenario wird die derzeit gültige Energiesteuererleichterung ab dem 01.01.2019 für den gesamten Betrachtungszeitraum fortgeführt. Für den Ausbau der Infrastruktur wird eine um drei Prozentpunkte höhere Wachstumsrate (8% p.a. statt 5% p.a.) angenommen, so dass für das Jahr 2040 ca. 7000 statt ca. 3800 CNG-Tankstellen angenommen werden. Zudem werden die zusätzlichen Kosten für die Bereitstellung der Erdgasinfrastruktur von 0,59 €/kg im Basis-Szenario auf 0,28 €/kg reduziert (vgl. S. 21).

Welche Rolle der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur auf dem zukünftigen Pkw-Markt spielen kann, wird im Szenario „Wasserstoff“ untersucht. Unter Beibehaltung aller Eingangsparameter des Basis-Szenarios wird lediglich die Verfügbarkeit der Wasserstoffinfrastruktur erhöht, so dass zu jedem Zeitpunkt der gesamte Bedarf an Wasserstoff im Straßenverkehr durch die vorhandene Infrastruktur abgedeckt ist. Weitere Annahmen zur Kostendegression der Brennstoffzellentechnologie, zur Sub-

ventionierung von Brennstoffzellenfahrzeugen oder zur Inkaufnahme mittelfristiger negativer Margen durch die Automobilhersteller werden nicht getroffen.

Tabelle 5: Übersicht der Abgrenzung der in der Studie betrachteten Szenarien

Szenarien →	Basis	CO ₂ Regulierung 70 g/km	CO ₂ Regulierung 95 g/km	Ölpreis	Erdgas	Wasserstoff
CO₂ – Regulierung						
Grenzwert 2040: 45 g/km	X			X	X	X
Grenzwert 2040: 70 g/km		X				
Grenzwert 2040: 95 g/km			X			
Ölpreis						
2040: 89 EUR ₂₀₁₀ /bbl	X	X	X		X	X
2040: 104 EUR ₂₀₁₀ /bbl				X		
Verfügbarkeit von Wasserstofftankstellen						
Moderater Netzausbau	X	X	X	X	X	
Zu jeder Zeit gegeben						X
Rahmenbedingungen für Erdgasfahrzeuge						
Auslaufender Steuervorteil, Moderater Netzausbau	X	X	X	X		X
Verlängerter Steuervorteil, Progressiver Netzausbau					X	

4. Ergebnisse der Szenario-Analyse

Im Rahmen dieser Szenario-Analyse wird untersucht, wie sich die Neuwagenflotte in Deutschland bei einer langfristig vorgegebenen CO₂-Regulierung zukünftig zusammensetzen könnte und welche Auswirkungen dies auf den Fahrzeugbestand, den Endenergieverbrauch (EEV), die CO₂-Emissionsentwicklung, die Steuereinnahmen und die Mobilitätskosten für Neufahrzeugkunden hat.

4.1 Basis-Szenario

Das Basis-Szenario untersucht, ausgehend vom CO₂-Ziel der aktuell geltenden EU-Verordnung von 95 g CO₂/km im Jahr 2020, eine denkbare Fortschreibung auf 70 g CO₂/km im Jahr 2030 und 45 g CO₂/km im Jahr 2040. Dabei ist im Modell hinterlegt, dass in jedem Segment der spezifische Flottengrenzwert für Deutschland erreicht wird (vgl. S.24). Dies ist so zu interpretieren, dass in bestimmten Jahren bei entsprechenden Emissionsvorgaben nur eine begrenzte Anzahl von Fahrzeugen auf dem Pkw-Markt angeboten wird, die oberhalb des geltenden CO₂-Grenzwertes liegen.

Neufahrzeugmarkt

Der ambitionierte CO₂-Zielpfad des Basis-Szenarios führt dazu, dass langfristig die Fahrzeugflotte im Markt vielfältiger wird und die Kunden in Zukunft unterschiedliche Antriebsoptionen auswählen. Bereits im Jahr 2020 bringt der Zielwert von 95 g CO₂/km hoch effiziente konventionelle Fahrzeuge mit fortschrittlichen Effizienzmaßnahmen in die Breite der Neuwagenflotte. Gleichzeitig erreichen Hybridfahrzeuge mit einer Kombination von elektrischem und konventionellem Antrieb erste substantielle Marktanteile.

Im Jahr 2030 steigt der Anteil der mit Strom zurückgelegten Fahrstrecke im Auto an. Einfache Parallel-Hybridfahrzeuge reichen dann nicht mehr aus, um die Emissionsvorgaben zu erreichen. Je nach Fahrprofil der Kunden kommen Fahrzeuge mit verlängerter Reichweite, Range-Extender, sowie stromnetzgebundene Plug-In-Hybride allmählich in den Markt.

Gegen Ende des Analysezeitraums 2040 steigt der Grad der Elektrifizierung weiter an und die Mehrzahl der Neuwagenkäufer entscheidet sich für Range-Extender (27%) und Plug-In-Hybride (26%). Diese fortschrittlichen Hybridvarianten sind mit einem Benzin- oder Dieselmotor ausgestattet, um die hohen Kundenansprüche zu erfüllen. Daher besitzen im Jahr 2040 noch 85% der Neufahrzeuge einen Verbrennungsmotor. Gleichzeitig werden etwa 80% aller Neufahrzeuge elektrifiziert sein (inkl. BEV, PHEV, REEV, HEV). Rein batterieelektrische Antriebe können hingegen die hohen Fahrleistungen und erforderlichen Reichweiten vieler Kundengruppen nicht realisieren und sind für die Mehrzahl der Kunden zu teuer. Sie stellen Nischenanwendungen für spezielle Fahrzyklen und besonders innovationsfreundliche Kunden dar (siehe Abbildung 8 und Tabelle 6). Insgesamt erreichen die elektrifizierten Fahrzeugkonzepte im kleinen und mittleren Segment die höchsten Marktanteile.

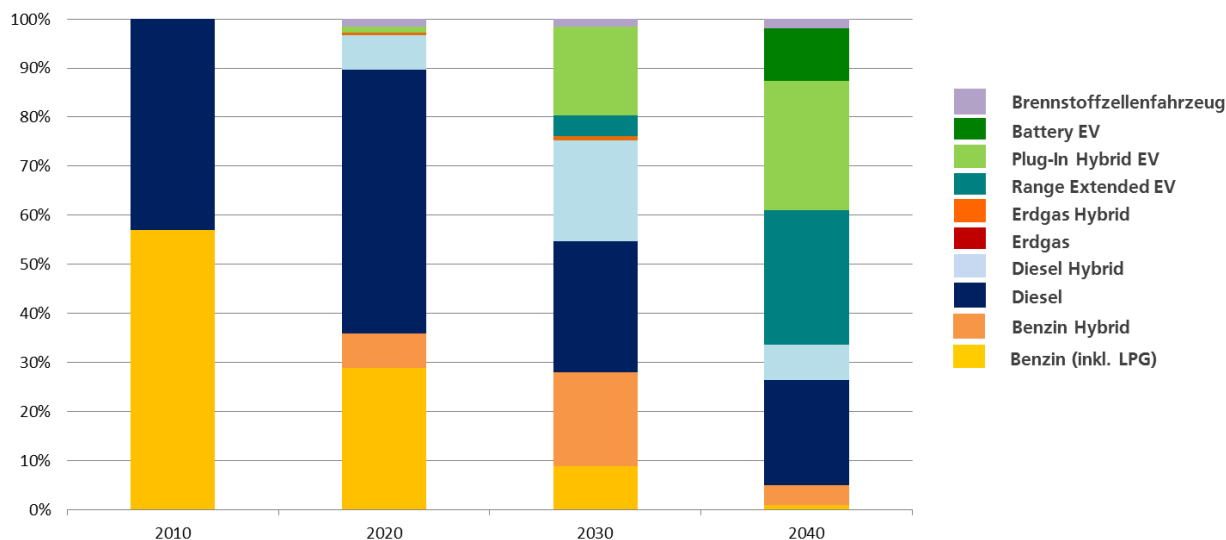


Abbildung 8: Entwicklung der Neufahrzeugflotte im Basis-Szenario in Deutschland bis 2040

Der in den vergangenen Jahren zu beobachtende Trend zu Dieselfahrzeugen hält im Basis-Szenario in naher Zukunft an. Bis 2020 wählt dabei die Mehrheit der Modellkunden konventioneller Antriebe den effizienteren Dieselantrieb. Im Gegensatz zum reinen Ottoantrieb bleibt der konventionelle Dieselantrieb noch langfristig im Markt. Verbrennungsmotoren, die mit Benzin betrieben werden, finden sich als wichtiger Bestandteil in den elektrifizierten Antriebskonzepten wie Plug-In Hybriden und Range Extendern wieder.

Tabelle 6: Neuzulassungszahlen im Basis-Szenario (in Tsd.)

Jahr	BEV+PHEV+REEV	FC	HEV (Diesel+Otto)	Erdgas	Diesel	Otto
2020	40	47	431	16	1.665	895
2030	690	50	1.233	29	828	273
2040	1.999	59	349	0	667	30

Effizienzverbesserungen, die im Modell durch Technologiepakete implementiert sind (siehe S. 19), kommen zunehmend in den Markt. Im Jahr 2020 werden sowohl für Diesel- als auch Ottoantriebe weitgehend hochwertige Technologiepakete nachgefragt, die gegenüber den entsprechenden Basismodellen weitaus geringere spezifische CO₂-Emissionen aufweisen, gleichzeitig aber auch mit höheren Kosten verbunden sind. Abbildung 9 illustriert diese veränderte Nachfrageentwicklung.

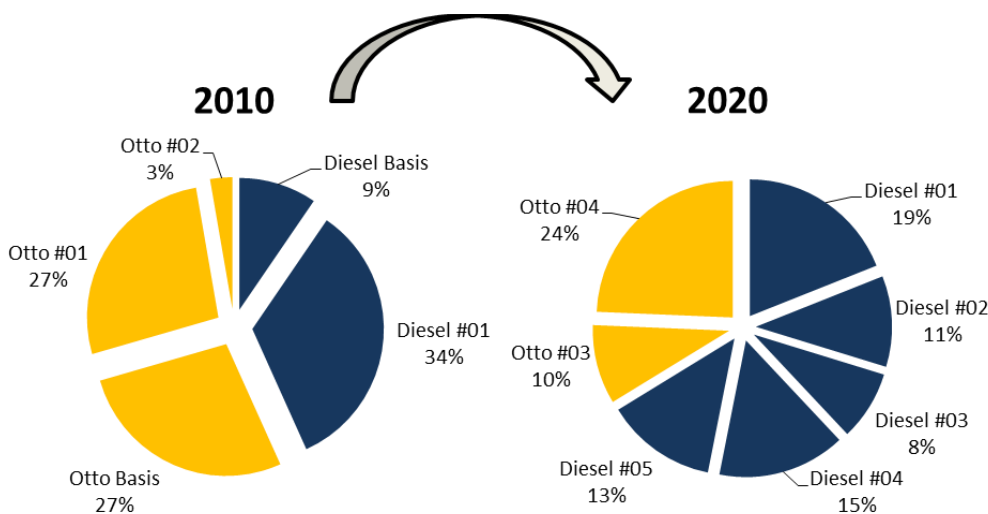


Abbildung 9: Nachfrage der Technologiepakete im mittleren Segment im Rahmen des Marktanteils für Otto und Diesel im Jahr 2010 und 2020 (vgl. S.19).

Bei den Ottoantrieben erfahren die effizientesten Technologiepakete starke Konkurrenz durch die alternativen Antriebe. Dies führt dazu, dass zum einen der Marktanteil der reinen Ottoantriebe kontinuierlich sinkt und zum anderen Technologiepakete mit besonders hoher Energieeffizienz bei vielen Kundengruppen zu höheren Kosten führen als etwa Parallel-Hybrid-Varianten (HEV).

Fahrzeugbestand

Der Fahrzeugbestand spiegelt die Entwicklung des Neufahrzeugmarktes wider. Da die jährlich hinzukommenden Neufahrzeuge allerdings nur etwa 7% des Gesamtbestandes ausmachen, verläuft diese Entwicklung entsprechend zeitverzögert. Bei einem Gesamtbestand von insgesamt 43 Mio. Fahrzeugen⁸ in Deutschland sind bis zum Jahr 2020 unter den Rahmenbedingungen des Basis-Szenarios rund 3% elektrifizierte Antriebe zu erwarten – davon rund 150.000 netzgebundene Antriebskonzepte und rund 1,3 Mio. Parallel-Hybridfahrzeuge. Dieser Anteil steigt bis zum Ende des Analysezeitraums kontinuierlich auf 65% an. Im Jahr 2040 dominieren die netzgebundenen Antriebskonzepte mit über 15 Mio. Fahrzeugen den Bestand, dicht gefolgt von den rein konventionellen Antrieben mit über 13 Mio. und den etwa 12 Mio. Hybridantrieben. Rein batterieelektrische Autos machen mit etwa 1,4 Mio. nur einen kleinen Teil der netzgebundenen Fahrzeuge aus. Insgesamt tragen im Jahr 2040 noch 95% aller Fahrzeuge einen Verbrennungsmotor an Bord (Abbildung 10).

⁸ Aufgrund des demografischen Wandels ist davon auszugehen, dass der Fahrzeugbestand von 43 Mio. Pkw in 2020 auf 41 Mio. in 2040 sinkt.

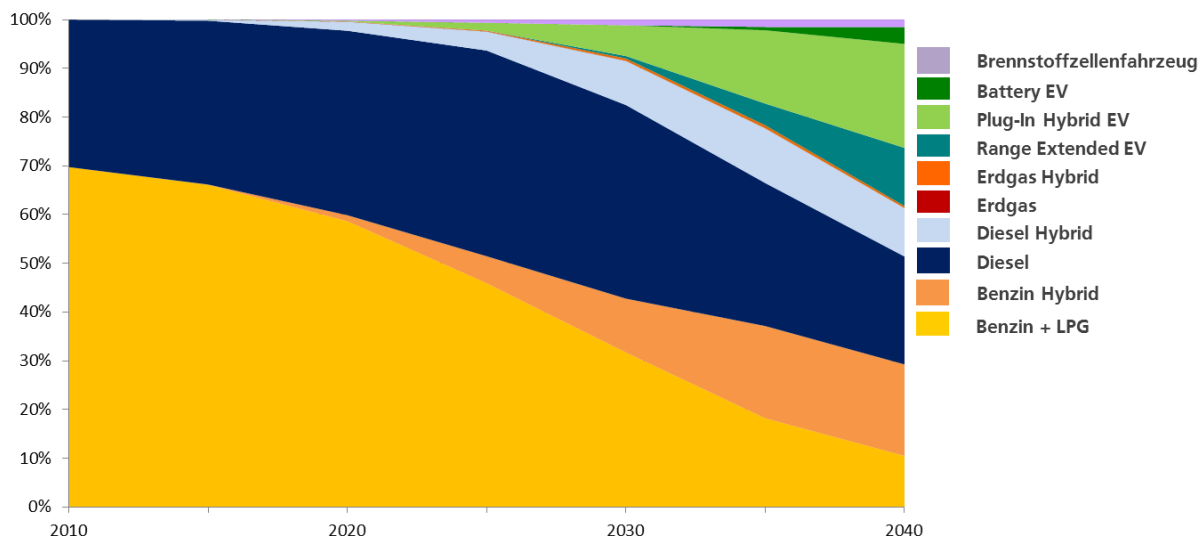


Abbildung 10: Entwicklung des Flottenbestandes im Basis-Szenario in Deutschland bis 2040

Endenergieverbrauch (EEV)

Die Effizienzverbesserung und die zunehmende Elektrifizierung haben erheblichen Einfluss auf den EEV der gesamten Fahrzeugflotte (Abbildung 11). Der Endenergieverbrauch sinkt im Basis-Szenario um 4,8% im Zeitraum von 2010 bis 2040 (von 1.352 PJ/a auf 699 PJ/a). Entsprechend der Veränderungen in der Fahrzeugflotte verschiebt sich der Verbrauch leicht hin zu Dieselmotoren. Im Jahr 2010 beträgt der Dieselanteil am EEV 41%. Im Laufe der Zeit steigt der Dieselanteil am EEV auf 46% im Jahr 2040 an, wobei der absolute Dieserverbrauch insgesamt im selben Zeitraum von 15,8 Mrd. Litern auf 8,9 Mrd. Liter sinkt. Ein signifikanter Stromanteil am EEV ist erst nach 2030 zu beobachten. Im Jahr 2040 beträgt der Stromanteil mit 28 TWh p.a. knapp 15% des EEV. Dieser Stromverbrauch entspricht 3,1 Mrd. Litern Benzinäquivalent⁹. Andere Energieträger wie Erdgas und Wasserstoff spielen nur eine untergeordnete Rolle, da sich die entsprechenden Antriebsvarianten unter den Rahmenbedingungen des Basis-Szenarios nicht durchsetzen können.

⁹ Die tatsächlich ersetzte Menge Benzins ist aufgrund des höheren Wirkungsgrades elektrischer Antriebe deutlich höher (etwa um den Faktor 3).

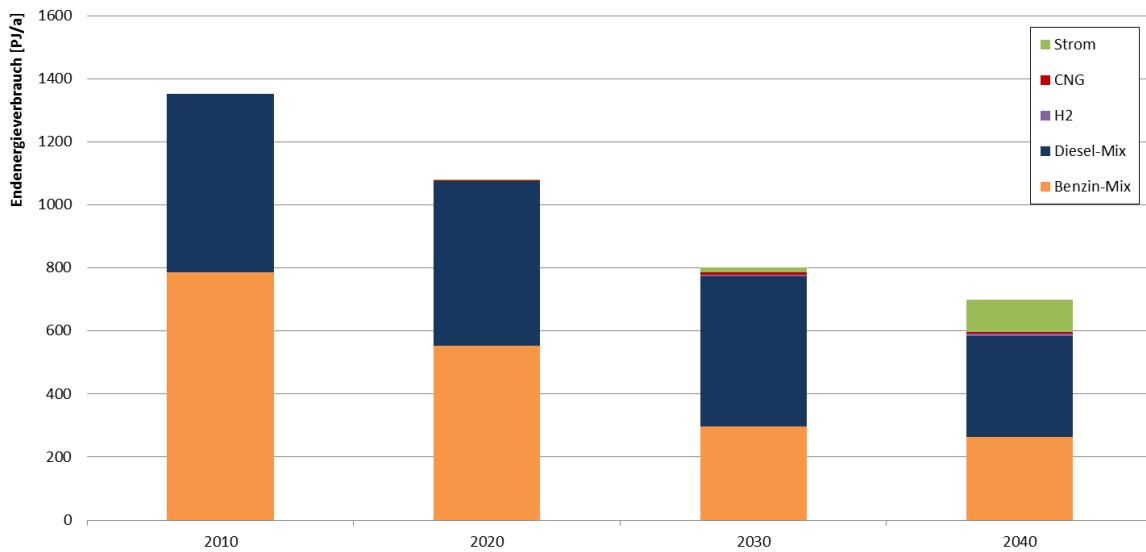


Abbildung 11: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Basis-Szenario.

THG-Emissionen der Flotte

Im Basis-Szenario sinken die gesamten CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel) der Pkw-Flotte in Deutschland um 54% bis 2040 (von 117 Mt CO₂ in 2010 auf 53 Mt CO₂ in 2040, siehe Abbildung 12). Diese Emissionsminderung begründet sich auf zwei Einflussfaktoren. Zum einen führt der Einsatz effizienterer Fahrzeugtechnologien in Kombination mit hochwertigen Kraftstoffen zu einer Reduktion der Tank-to-Wheel-Emissionen im genannten Zeitraum von 99 Mt CO₂ 2010 auf 40 Mt CO₂ 2040. Zusätzlich kann bei der Bereitstellung der einzelnen Energieträger (Well-to-Tank) eine Emissionsreduktion von 18 Mt CO₂ 2010 auf 13 Mt CO₂ 2040 realisiert werden. Letzteres ist vor allem auf den zunehmenden biogenen Anteil bei konventionellen Kraftstoffen und die Umstellung der Elektrizitätsproduktion auf erneuerbare Quellen zurückzuführen.

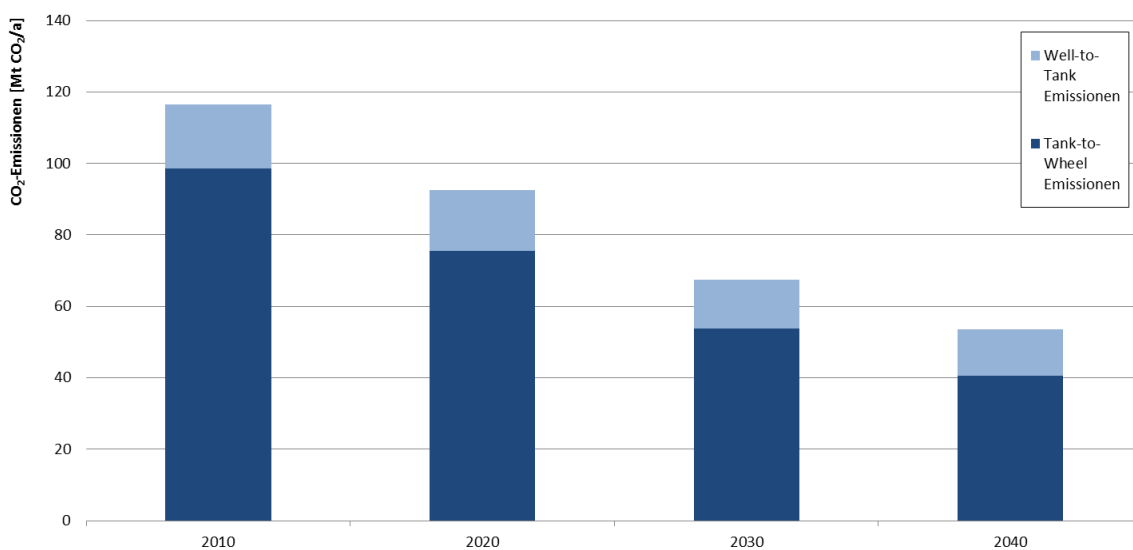


Abbildung 12: Entwicklung der CO₂-Emissionen im Basis-Szenario.

Steuereinnahmen

Analog zum Verlauf des Benzin- und Dieserverbrauchs entwickeln sich die Steuereinnahmen aus der Energiesteuer und der Mehrwertsteuer auf die konventionellen Energieträger (siehe Abbildung 13). Die Energiesteuer hat mit Inkrafttreten der Novelle des Energiesteuergesetzes die Mineralölsteuer abgelöst. Im Jahr 2040 ist mit nur noch knapp der Hälfte des Steueraufkommens aus dem Jahr 2010 zu rechnen. Der Rückgang ist auf den Wechsel hin zu elektrifizierten Antrieben und auf die zunehmende Effizienz der konventionellen Antriebe zurückzuführen. Hierbei ist eine spezielle Steuer auf den im Straßenverkehr genutzten Fahrstrom und Wasserstoff nicht berücksichtigt. Weiterhin wird angenommen, dass die Energiesteuer auf Benzin und Dieselkraftstoff real auf dem aktuellen Niveau bleibt. Zudem ist das erhöhte Mehrwertsteueraufkommen durch die kostenintensiveren Effizienzpakete konventioneller Antriebe sowie die vergleichsweise hohen Technikkosten alternativer Antriebe nicht betrachtet.

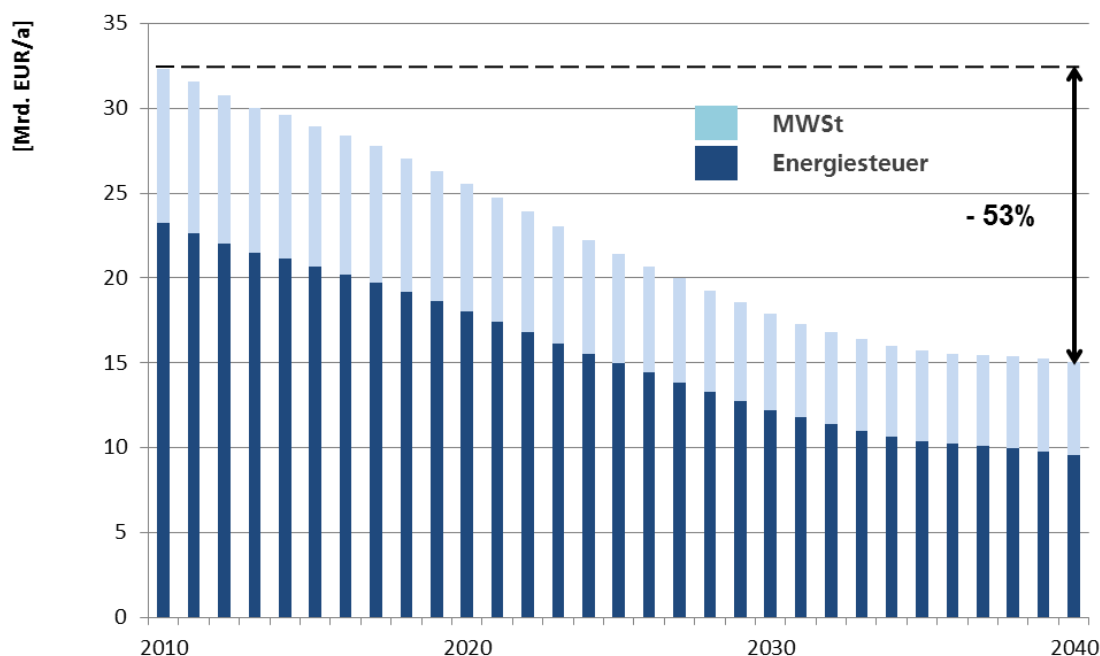


Abbildung 13: Auswirkungen auf die Steuereinnahmen im Basis-Szenario in Deutschland bis 2040 (MWSt. beinhaltet nur Kraftstoffabsatz und nicht Fahrzeugverkauf)

Mobilitätskosten

Die Veränderungen in der Neufahrzeugflotte wirken sich auch auf die Mobilitätskosten aus. Im ersten Schritt werden die durchschnittlichen Kosten aller Kunden jedes Segments analysiert und ausgewiesen. Diese Durchschnittsbetrachtung liefert wichtige Ergebnisse über die Entwicklung des Kostenniveaus der einzelnen Fahrzeugsegmente. Aus Kundensicht sind aber vor allem die Mobilitätskosten bei einem bestimmten Fahrprofil entscheidend. Daher werden in einem zweiten Schritt zwei Kundentypen näher untersucht und deren Mobilitätskosten exemplarisch dargestellt. Zur Auswahl der geeigneten Kundentypen wurde auf die Daten der nationalen Mobilitätsstudie „Mobilität in Deutschland“

zurückgegriffen (DLR & infas, 2008). So ist für jedes Segment die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines „typischen“ Benzin- und Dieselfahrers identifiziert worden. **Tabelle 10** im Anhang illustriert die Auswahl der Kundentypen. Für jeden dieser Kundentypen werden die Mobilitätskosten auf Basis der *Total-Cost-of-Ownership*- (TCO-)Methodik¹⁰ ermittelt.

Bei siebenjähriger Nutzung¹¹ steigen die Gesamtkosten von 2010 bis 2040 insgesamt im Kleinwagen-segment um etwa 30% (0,89% p.a.), in der Mittelklasse um 25% (0,75% p.a.) und in der Oberklasse um 22% (0,67% p.a.) an. Hauptursache dafür sind die Anschaffungskosten, die je nach Segment und Jahr um 2500 bis rund 8000 Euro ansteigen. Zwar sinken die variablen Kosten mittelfristig, sie können aber die höheren Anschaffungskosten nicht vollständig kompensieren. Langfristig nimmt der Vorteil bei den variablen Kosten vor allem bei Klein- und Mittelklassewagen sogar wieder ab. Dies liegt zum einen daran, dass die Effizienzfortschritte konventioneller Antriebe den steigenden Kraftstoffpreis überkompensieren und gleichzeitig der Strompreisanstieg bei zunehmender Elektrifizierung der Fahrzeugflotte immer stärker ins Gewicht fällt (siehe Abbildung 14).

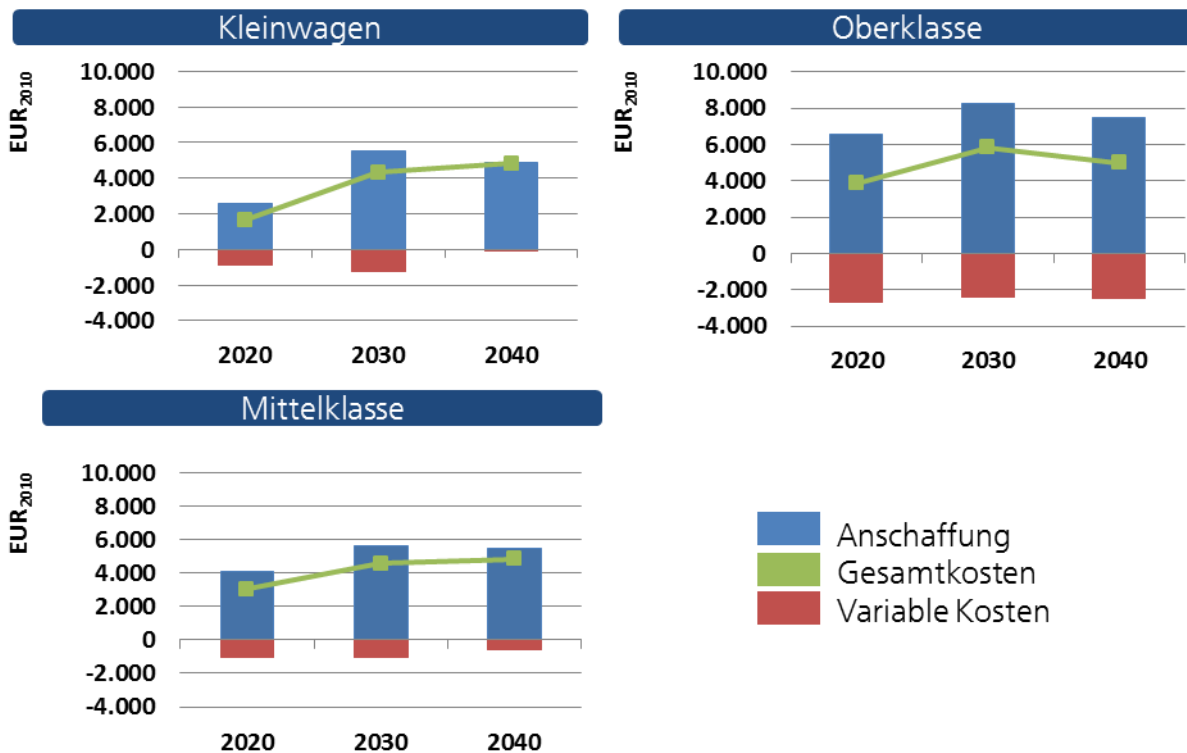


Abbildung 14: Durchschnittliche Mehrkosten der Pkw-Anschaffung gegenüber Fahrzeugpreis 2010; Summe der variablen Kosten bei einer Haltedauer von sieben Jahren; resultierende Gesamtkosten

¹⁰ Im Folgenden wird der TCO-Begriff mit den in (Mock, 2010) definierten RCO gleichgestellt (siehe auch Seite 9 ff.)

¹¹ Im Rahmen dieser Studie ist eine konservative Kostenkalkulation vorgenommen worden, so dass die der Kalkulation unterstellte Nutzungsdauer über der durchschnittlichen Haltedauer deutscher Neufahrzeuge liegt.

Bei der exemplarischen Betrachtung einzelner Kundentypen ergibt sich ein differenzierteres Bild. Aufgrund der Bandbreite der Jahresfahrleistung aller Kunden geben die Durchschnittskosten nur unzureichend Auskunft über die Entwicklung der individuellen Mobilitätskosten eines Kundentypen. Ein „typischer“ Otto-Fahrer im mittleren Fahrzeugsegment mit einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 12.300 km entscheidet sich unter aktuellen Bedingungen für ein Antriebskonzept mit Ottomotor. Mittelfristig entscheidet er sich für konventionelle Ottoantriebe, wobei deren Effizienz mit der Zeit ansteigt (Otto Basis im Jahr 2010 und Otto #04 im Jahr 2020). Langfristig schwenkt er auf ein elektrifiziertes Antriebskonzept um. Im Jahr 2030 und 2040 wählt er einen PHEV. Seine Mobilitätskosten steigen im Betrachtungszeitraum (2010-2040) um 29%. Damit erfährt dieser spezielle Kundentyp einen überdurchschnittlichen Kostenanstieg (25% im mittleren Segment, siehe Abbildung 14). Wie in Abbildung 15 zu erkennen ist, beträgt der Kostenanstieg 2030 sogar 40% gegenüber dem Jahr 2010 und fällt im Jahr 2040 auf 29%. Die langfristige Reduktion ist auf die Lerneffekte und die damit verbundene Kostendegression bei den neuen Antriebstechnologien zurückzuführen. Erst durch den erhöhten Absatz elektrifizierter Antriebskonzepte sinken deren Komponentenkosten, was sich wiederum auf die Preise dieser Fahrzeuge auswirkt. Insgesamt verbleiben die Mobilitätskosten des „typischen“ Otto-Fahrers somit auf einem höheren Niveau als 2010.

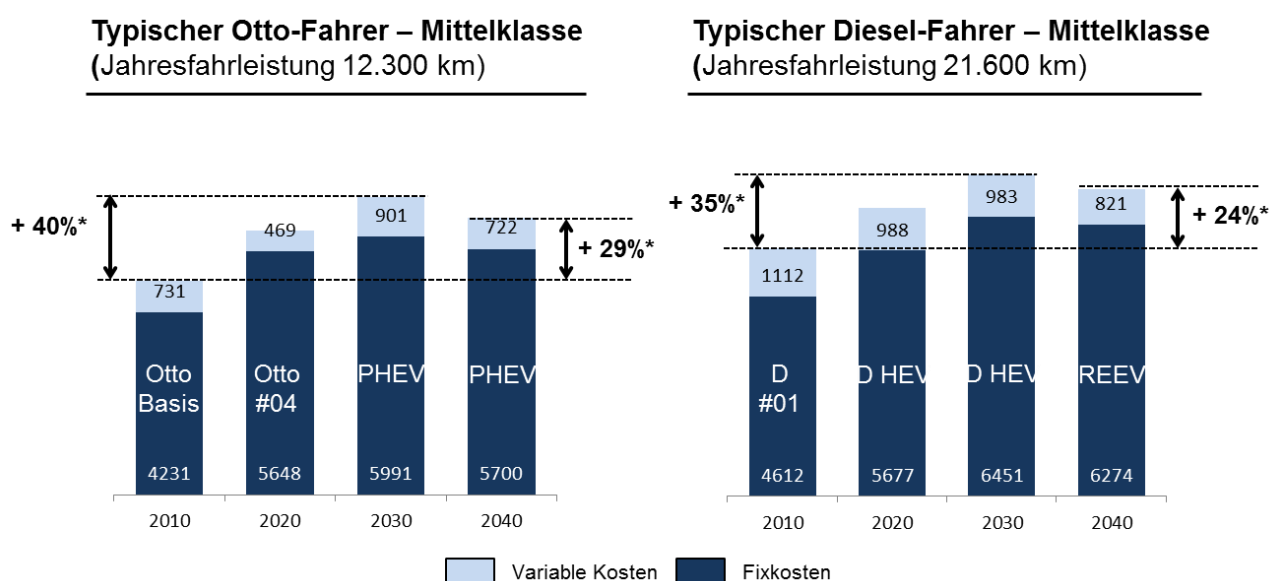


Abbildung 15: Entwicklung der jährlichen Mobilitätskosten für unterschiedliche Kundentypen (in EUR₂₀₁₀). *Modellergebnisse, Werte in Grafik gerundet

Die Mobilitätskosten eines Diesel-Fahrers mit einer Jahresfahrleistung von 21.600 km steigen im Betrachtungszeitraum um lediglich 24% (siehe Abbildung 15). Ausgehend von einem konventionellen Dieselfahrzeug im Jahr 2010, entscheidet sich der „typische“ Diesel-Fahrer bereits 2020 für einen parallelen Dieselhybrid. Allerdings schwenkt er - mit einem REEV - erst 2040 auf ein höher elektrifiziertes Antriebskonzept um. Aufgrund seiner hohen Jahresfahrleistung rentieren sich effizientere Antriebskonzepte mit höheren Anschaffungskosten bereits zu einem früheren Zeitpunkt als für einen Kundentyp mit geringerer Jahresfahrleistung. Durch den Aufpreis des Dieselantriebes zu einem Ben-

ziner fällt der prozentuale Preisunterschied zwischen Diesel und alternativen Antriebskonzept entsprechend geringer aus. Somit steigen seine Mobilitätskosten von 2010 bis 2040 leicht unterdurchschnittlich (24% statt 25%). Auch seine maximale Kostensteigerung im Jahr 2030 fällt mit 35% vergleichsweise geringer aus.

4.2 Alternative Szenarien

Szenario CO₂-Regulierung 70 g/km

Um die Bedeutung der CO₂-Regulierung für die Zusammensetzung der künftigen Neufahrzeugflotte und die daraus resultierenden Auswirkungen zu untersuchen, werden in der vorliegenden Studie weitere Emissionspfade analysiert. Das Szenario *CO₂-Regulierung 70 g/km* weist gegenüber dem Basis-Szenario eine moderatere Entwicklung der CO₂-Regulierung auf. Der CO₂-Regulierungspfad wird ausgehend von 95 g/km 2020 auf 85 g/km 2030 und auf 70 g/km 2040 fortgeschrieben.

Im Vergleich zum Basis-Szenario können konventionelle Antriebe langfristig höhere Marktanteile halten (siehe Abbildung 16 und

Tabelle 11 im Anhang). Gleichzeitig können sich netzgebundene Hybridmodelle (PHEV, REEV) langfristig gegenüber Parallel-Hybriden nicht so stark durchsetzen wie im Basis-Szenario. Als Folge werden in diesem Szenario auch im Jahr 2040 nahezu 100% der Neufahrzeuge einen Verbrennungsmotor an Bord haben. Insgesamt sind 2040 rund 70% (anstatt 80% im Basis-Szenario) der Neuzulassungen elektrifiziert. Dennoch sinken die Well-to-Wheel Emissionen im Zeitraum 2010 bis 2040 um 49%. Gegenüber den Emissionsvorgaben des Basis-Szenarios liegt demnach die Emissionsminderung des Szenarios *CO₂-Regulierung 70 g/km* lediglich 5 Prozentpunkte niedriger. Der Endenergieverbrauch sinkt entsprechend um 45% von 1352 PJ im Jahr 2010 auf 734 PJ im Jahr 2040. Infolge der damit verbundenen Absatzrückgänge konventioneller Kraftstoffe sinken die Steuereinnahmen im selben Zeitraum um 50%, was einen Unterschied von 3 Prozentpunkten zum Basis-Szenario (53% Steuerausfälle) ausmacht.

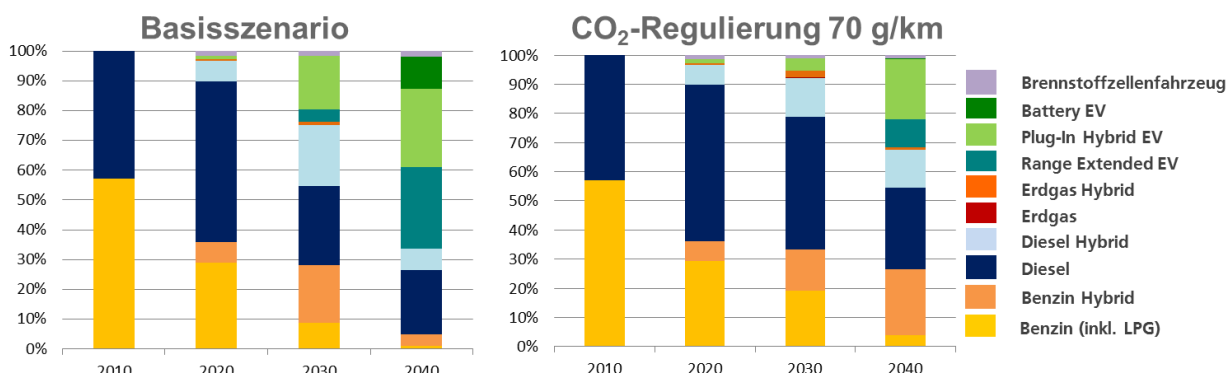


Abbildung 16: Sensitivitätsanalyse für die CO₂-Regulierung (Regulierung ab 2020 auf 70 gCO₂/km bis 2040)

Szenario CO₂-Regulierung 95 g/km

Das Szenario *CO₂-Regulierung 95 g/km* zeigt die Marktentwicklung für eine Regulierung der CO₂-Emissionen für Neufahrzeuge, die auf dem Niveau von 2020 verharret und langfristig keine weitergehenden Emissionsvorgaben vorsieht (siehe Abbildung 17 und

Tabelle 11 im Anhang). In diesem Szenario sind im Markt nach 2020 kaum Veränderungen zu erkennen. Die Marktanteile der bis 2020 aufkommenden Parallel-Hybridfahrzeuge steigen langfristig nicht nennenswert an. Diesel-Hybride werden ab 2020 sogar sukzessive von Erdgasfahrzeugen ersetzt. So erreichen CNG-Fahrzeuge in diesem Szenario im Jahr 2040 ca. 5% des Neufahrzeugmarktes und damit im Szenarien-Vergleich den höchsten Marktanteil für Erdgas. Stromnetzgebundene Antriebskonzepte (BEV-, PHEV- und REEV) spielen in diesem Szenario keine Rolle. Die Well-to-Wheel Emissionen sinken bis zum Jahr 2040 um 40%, gegenüber der CO₂-Minderung von 54% im Basis-Szenario. Für den Endenergieverbrauch ergibt sich eine entsprechend geringere Reduktion von 38% von 1.352 PJ im Jahr 2010 auf 840 PJ im Jahr 2040. Folglich fallen auch die Steuermindereinnahmen im selben Zeitraum mit 45% geringer aus als im Basis-Szenario (53%).

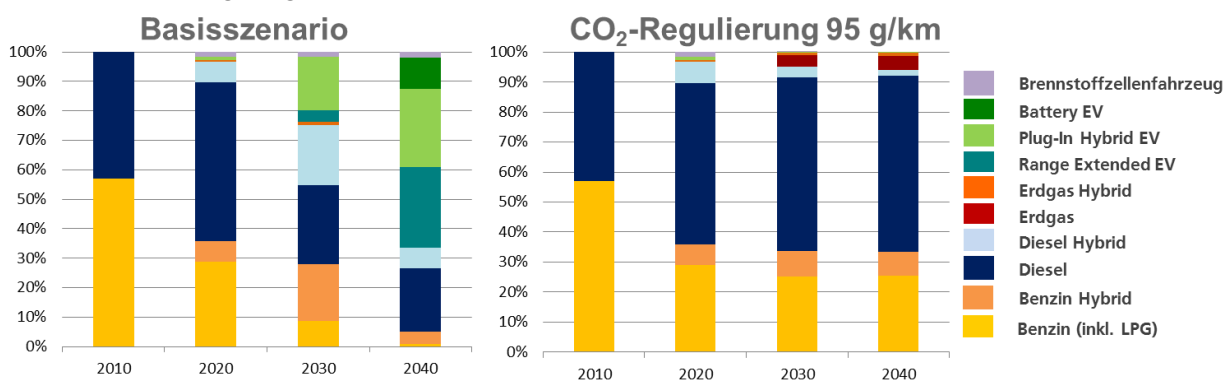
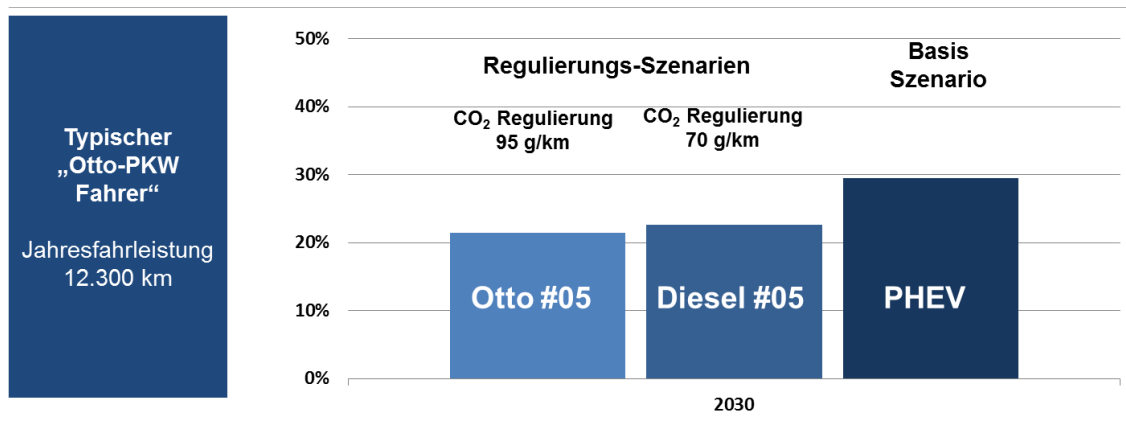


Abbildung 17: Sensitivitätsanalyse für die CO₂-Regulierung (Regulierung ab 2020 auf ein konstantes Niveau von 95 g CO₂/km bis 2040)

Zusätzlich zu der Gesamtmarkt Betrachtung werden in der vorliegenden Studie auch das Kaufverhalten und die Mobilitätskostenerhöhung der typischen Kunden im Szenarien-Vergleich analysiert. Abbildung 18 verdeutlicht beispielhaft, dass die Kostensteigerung in direktem Zusammenhang mit der CO₂-Regulierung steht. Im Jahr 2030 wählt der „typische“ Otto-Fahrer aufgrund der vergleichsweise scharfen Emissionsregulierung in Basis-Szenario mit einem PHEV bereits ein elektrifiziertes Fahrzeugkonzept. Im Szenario CO₂-Regulierung 70 g/km fällt seine Wahl zum selben Zeitpunkt aufgrund der höheren Effizienz im Vergleich zum Benzin auf einen Diesel (Effizienzpaket #05) (Szenario CO₂-Regulierung 70 g/km).



EU CO₂-Grenzwert in 2030 (g/km)



Abbildung 18: Einfluss der CO₂-Regulierung auf das Kaufverhalten und die Mobilitätskostenerhöhung (relative Veränderung in % zum Basisjahr 2010) der typischen „Otto-PKW Fahrer“ mit Jahresfahrleistung von 12.300 km in 2030

Im Falle regulatorischer Anforderungen, die auf dem Niveau von 2020 eingefroren werden (Szenario *CO₂-Regulierung 95 g/km*), fährt der „typische“ Otto-Fahrer auch 2030 noch ein Fahrzeug mit konventionellem Otto-Antrieb (Effizienzpaket #05). Der Unterschied der Antriebswahl spiegelt sich in der Kostensteigerung vom Jahr 2010 auf das Jahr 2030 wider. Im moderateren Regulierungspfad fällt sie mit 23% um 6 Prozentpunkte geringer aus als im Basis-Szenario. Im Falle eines Emissionsgrenzwertes von 95 g/km im Jahr 2030, steigen die Mobilitätskosten um lediglich 21%, was einem Unterschied von 8 Prozentpunkten zum Basis-Szenario entspricht.

Szenario Ölpreisvariante

Der im Basis-Szenario angenommene Preispfad wurde in diesem Szenario variiert und stützt sich nun auf das „*Current Policies Scenario*“ der Internationalen Energieagentur (IEA, 2012). Damit liegt der angenommene Ölpreis für das Jahr 2040 gegenüber dem IEA-Referenzpfad um ca. 18% höher und im Jahr 2040 bei 149 USD₂₀₁₁/bbl (IEA, NPS-Referenzszenario: 127 USD₂₀₁₁/bbl). Die Erhöhung des Ölpreises zeigt leichte Auswirkungen (Abbildung 19 und

Tabelle 11 im Anhang) auf die Neufahrzeugflotte. Um diese geringen Veränderungen sichtbar zu machen, sind nachfolgend die kumulierten Ergebnisse dargestellt (Abbildung 20). Kurzfristig werden bis zum Jahr 2020 kumulativ rund 215.000 mehr Dieselfahrzeuge zugelassen als im Basisszenario. Langfristig ändert sich jedoch dieses Bild und die Zahl der Dieselfahrzeuge sinkt bis 2040 gegenüber dem Basisszenario. Diese langfristig entstehende Lücke schließen alternative Antriebe. Am stärksten nimmt der Anteil bei BEV und REEV zu, gefolgt von Diesel-Hybridmodellen. Darüber hinaus kommen PHEV und geringfügig auch zusätzliche Brennstoffzellenfahrzeuge in den Markt. Insgesamt ersetzen diese Antriebsformen kumuliert in den 30 Jahren bis 2040 ca. 1,3 Mio. Fahrzeuge im Markt.

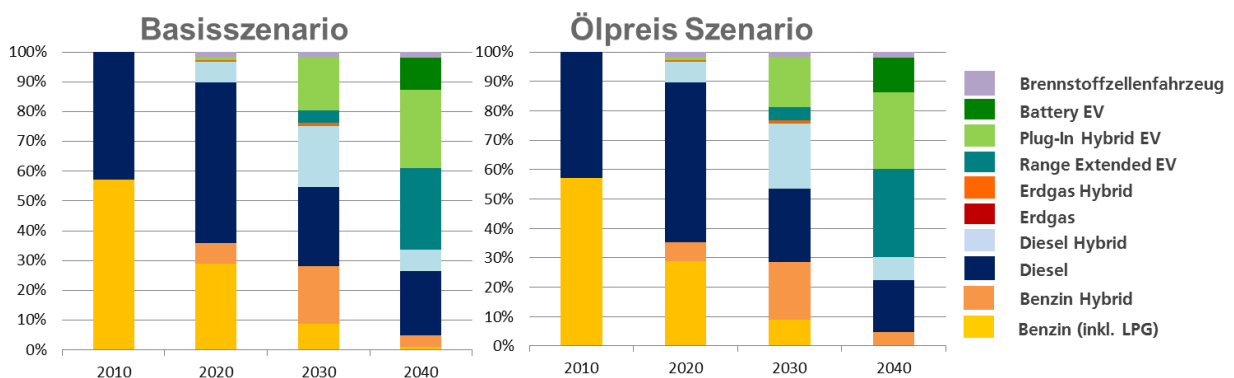


Abbildung 19: Auswirkungen eines hohen Ölpreises auf Neufahrzeugzulassungen

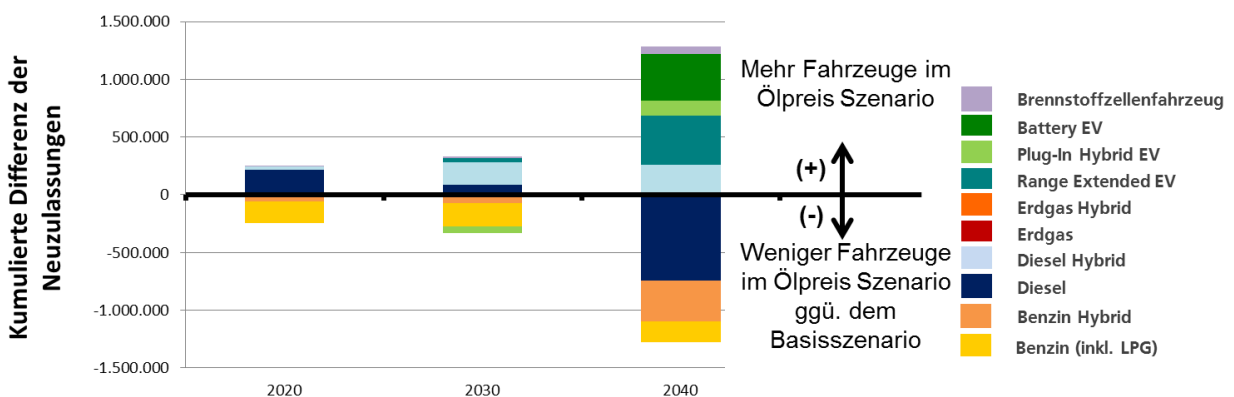


Abbildung 20: Kumulierte Differenz der Neuzulassungen für einen höheren Ölpreis gegenüber dem Basis-Szenario

Die durchschnittlichen Mobilitätskosten (sieben Jahre Haltedauer) erhöhen sich im Jahr 2040 im Kleinwagensegment um 124 EUR im Vergleich zum Basis-Szenario. In der Mittelklasse beträgt der Unterschied 348 EUR und für die Oberklasse 1050 EUR. Dies ist zum einen auf den leicht höheren Marktanteil hochpreisiger alternativer Antriebskonzepte zurückzuführen. Zum anderen führt ein höherer Rohölpreis zu höheren variablen Kosten für alle Antriebskonzepte mit Verbrennungsmotor, welche im Jahr 2040 in Summe immer noch weit über 80% des Neufahrzeugmarktes ausmachen.

Erdgas-Szenario

Die CNG-Fahrzeuge können sich im Basis-Szenario nicht substantiell durchsetzen und stellen nur einen Nischenmarkt dar. Um zu untersuchen, ob eine Variation der Rahmendaten zu erhöhten

Marktanteilen für Erdgasfahrzeuge führen kann, werden in einem weiteren Szenario verschiedene Parameter zu Gunsten der CNG-Fahrzeuge verändert. So unterstellt das Erdgas-Szenario, dass die derzeit geltende Steuerbegünstigung für Erdgas als Kraftstoff bis 2040 weitergeführt wird (im Basis-Szenario läuft die Begünstigung zum Jahr 2019 aus). Darüber hinaus wird in diesem Szenario die zukünftige Verfügbarkeit von CNG gegenüber dem Basispfad erhöht. Wie im Szenarienaufbau beschrieben (vgl. S. 25) steigt die Zahl der CNG-Tankstellen somit auf 7000 im Jahr 2040 statt der im Basis-Szenario angenommenen 3800. Als eine weitere Maßnahme wird der Kostenanteil des Infrastrukturaufbaus am CNG-Preis von 0,59 EUR/kg auf 0,28 EUR/kg gesenkt.

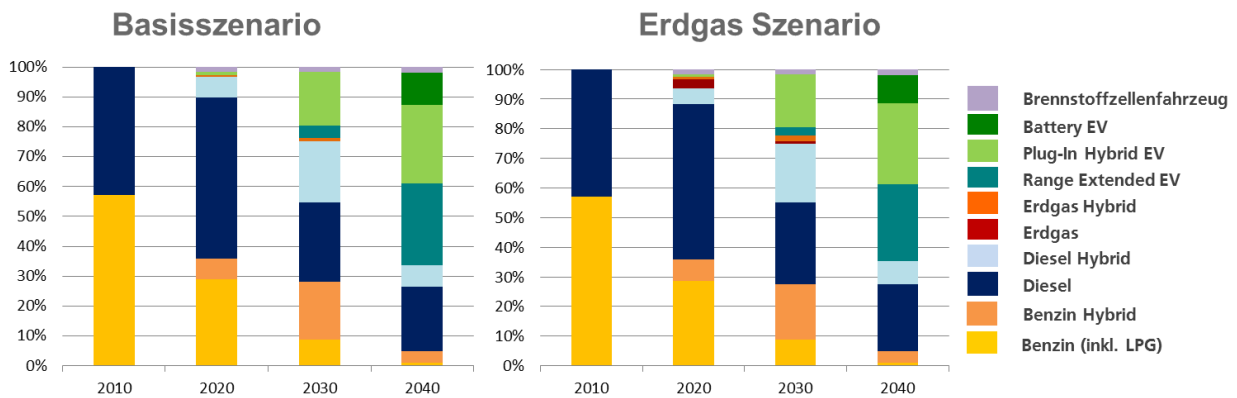


Abbildung 21: Auswirkung einer erhöhten CNG-Tankstellenauslastung zusätzlich zu den Maßnahmen des CNG Szenarios auf die Neuzulassungen.

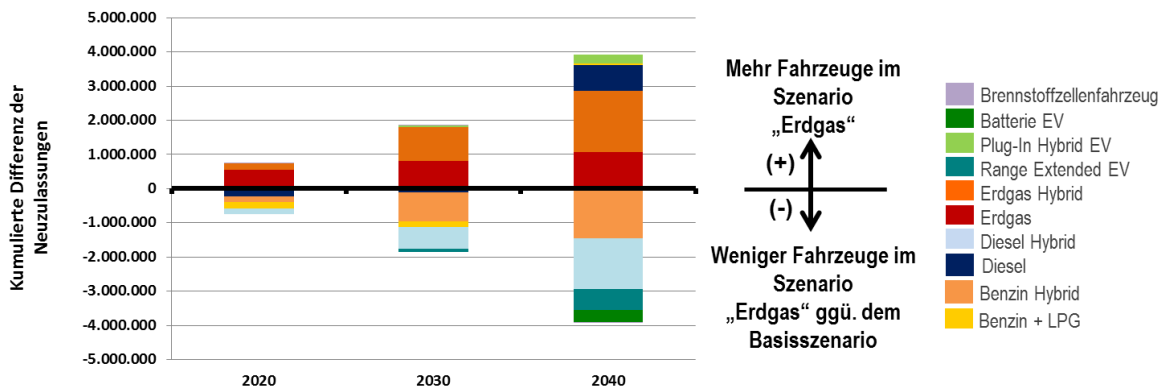


Abbildung 22: Kumulierte Differenz der Neuzulassungen bei höherer CNG-Tankstellenauslastung gegenüber dem Basis-Szenario

Die Ergebnisse zeigen, dass die geänderten Parameter die Kaufentscheidungen der Kunden nicht wesentlich beeinflussen (siehe Abbildung 21 und

Tabelle 11 im Anhang). Im Vergleich zum Basis-Szenario ist zu beobachten, dass die kumulierte Zahl der Neuzulassungen der konventionellen CNG-Antriebe und insbesondere der CNG-Hybride im Vergleich zum Basis-Szenario zunimmt (siehe Abbildung 22). Die Zahl der Neuzulassungen pro Jahr erreicht bei konventionellen CNG-Antrieben bereits vor 2020 ein Maximum von etwa 110.000 Fahrzeugen. Unter den im variierten Szenario gegebenen Rahmenbedingungen zeigen CNG-Hybridantriebe ein deutlich höheres Potential. Ihr kumulierter Absatz liegt im betrachteten Zeitraum bei 2,1 Mio. Fahrzeugen, im Gegensatz zu etwa 1 Mio. konventionellen CNG-Fahrzeugen. Dies gilt insbesondere für die Oberklasse, in welcher die CNG-Hybridantriebe im Zeitraum 2025-2035 einen Marktanteil von etwa 10% halten können. Langfristig nehmen die Marktanteile dann aber wieder aufgrund der Konkurrenz zu den auf Markt drängenden stärker elektrifizierten Antriebskonzepten ab. PHEV- und REEV-Konzepte mit einem CNG-Verbrennungsmotor sind im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet worden.

Wasserstoff-Szenario

Zusätzlich zu den Szenarien zur CO₂-Regulierung und des Ölpreises wurde in dieser Studie auch die Verfügbarkeit von Wasserstoff für den Straßenverkehr variiert. In diesem Szenario gilt die Annahme, dass die Wasserstoffverfügbarkeit (und damit die Wasserstoffinfrastruktur) ab 2010 keine Restriktion für die Kaufentscheidung der Kunden mehr darstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich im Wasserstoff-Szenario mit 7% Marktanteil bei den Neufahrzeugen 5 Prozentpunkte mehr Kunden für Brennstoffzellenfahrzeug entscheiden als im Basis-Szenario (siehe Abbildung 23 und

Tabelle 11 im Anhang). Somit werden bis zum Jahr 2040 kumulativ ca. 2,3 Mio. mehr Brennstoffzellenfahrzeuge als im Basis-Szenario zugelassen. Dieses Szenario verdeutlicht die Wichtigkeit der Wasserstoffinfrastruktur für die Kaufentscheidung. Nichtsdestotrotz ist es auch ersichtlich, dass die Wasserstoffinfrastruktur nicht die einzige Hürde bei der Markteinführung des Brennstoffzellenfahrzeuges ist. Weitere Annahmen zur Kostendegression der Brennstoffzellentechnologie o.ä. sind im Rahmen dieses Szenarios nicht betrachtet worden.

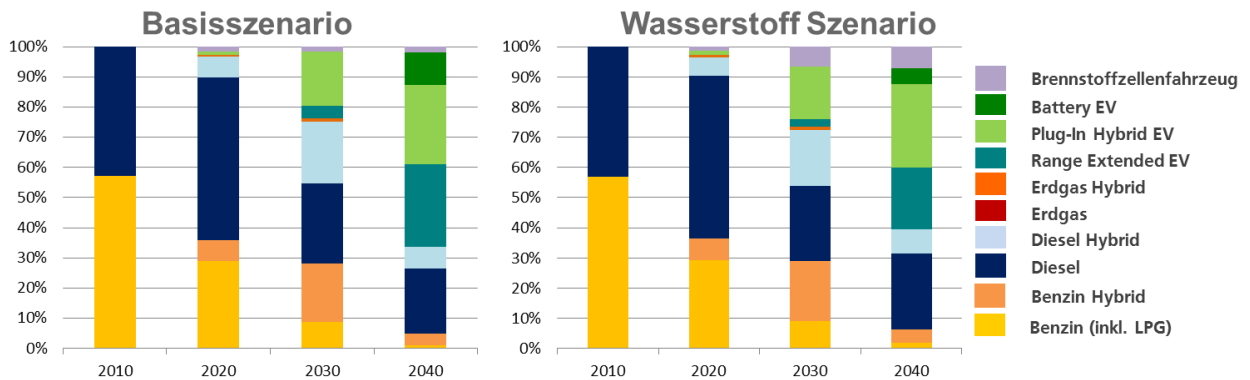


Abbildung 23: Auswirkungen von Wasserstoffinfrastruktur (100%Verfügbarkeit) auf Neufahrzeugzulassungen

5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Szenario-Analyse zeigen: Bei ambitionierten Klimaschutzvorgaben wird das Auto in Zukunft deutlich weniger Kraftstoff verbrauchen und der Anteil der mit elektrischem Strom zurückgelegten Fahrstrecken zunehmen. Auch bei einem strengen Emissionsgrenzwert von 45 g CO₂/km im Jahr 2040 haben 85 Prozent der verkauften Neuwagen einen Verbrennungsmotor installiert, der zum Teil als Reichweitenverlängerer in Hybridmodellen fungiert. Betrachtet man den Fahrzeugbestand, liegt der Anteil noch bei 95 Prozent. Innovative Verbrennungsmotoren sowie eine starke Hybridisierung ermöglichen eine Halbierung der CO₂-Emissionen des Pkw-Bestands bis 2040 auch ohne den Wechsel auf andere Verkehrsträger. Eine strenge Regulierung führt allerdings auch zu Mehrkosten und Steuerausfällen.

Für die Mehrzahl der Kunden kann der höhere Anschaffungspreis durch Einsparungen bei Energiekosten durch Effizienz oder Energieträgerwechsel nicht vollständig kompensiert werden. Lernkurven reduzieren die anfangs hohen Kosten der neuen Technologien, trotzdem verbleiben die zukünftigen Mobilitätskosten für den Autofahrer auf einem deutlich höheren Niveau als heute. Im Basis-Szenario betragen die durchschnittlichen Mehrkosten in den kommenden 30 Jahren je nach Fahrzeugsegment zwischen 22 und 30 Prozent. Der Verbrauchsrückgang an Mineralölprodukten infolge der ambitionierten Emissionsvorgaben führt im Basis-Szenario zu Steuerausfällen von bis zu 53 Prozent im Jahr 2040.

Bei moderateren Regulierungsanforderungen steigen die Mobilitätskosten nicht ganz so deutlich an und die Steuerausfälle fallen geringer aus. Jedoch sind auch hier die monetären Effekte erheblich, die Unterschiede zum Basis-Szenario liegen im Bereich einstelliger Prozentpunkte. Erhöhte Mobilitätskosten lassen sich unter den Rahmenbedingungen der Emissionsregulierung bei gleichbleibendem Mobilitätsbedarf zwar nicht verhindern, allerdings führen Lerneffekte und der steigende Absatz alternativer Antriebe dazu, dass langfristig diese Mehrkosten wieder sinken. Die Preisentwicklung fossiler Kraftstoffe spielt in Anbetracht der CO₂-Regulierung eine untergeordnete Rolle für den Markterfolg der alternativen Antriebe.

Erdgasfahrzeuge erreichen im Basis-Szenario lediglich einen Nischenmarkt. Auch unter den erweiterten Annahmen des Erdgas-Szenarios bleiben die Marktanteile bei den Neuzulassungen im gesamten Betrachtungszeitraum unter einem Niveau von 10 Prozent. Allein in der Oberklasse können hybridisierte Erdgasfahrzeuge eine Alternative darstellen, die über einen längeren Zeitraum Marktanteile jenseits der 10 Prozent Marke behaupten kann. Wasserstoff kann sich ohne die benötigte Infrastruktur nicht als Energieträger für Pkw durchsetzen. Auch bei vorhandener Infrastruktur stellen die Kosten dieses Antriebskonzeptes eine zu überwindende Hürde auf dem Weg zu Marktanteilen jenseits der 10-Prozent-Marke dar.

Es kann argumentiert werden, dass Pkw in Zukunft mit einem breiteren Energieträgermix fahren werden, der im Wesentlichen auf Öl und Strom basiert. Eine langfristig angelegte CO₂-Regulierung kann den nötigen Innovationsdruck zur Markteinführung elektrifizierter Antriebskonzepte auslösen. Erhöhte Mobilitätskosten können sich unter den Rahmenbedingungen der Emissionsregulierung bei gleichbleibendem Mobilitätsbedarf zwar nicht verhindern lassen, allerdings führen Lerneffekte und der steigende Absatz alternativer Antriebe dazu, dass langfristig diese Mehrkosten wieder sinken.

Intensivierte Forschung und Entwicklung im Bereich der alternativen Antriebskonzepte können deren Kostendegression vorantreiben und somit die Kundenentscheidung zu deren Gunsten unterstützen. Dennoch ist der Pkw-Verkehr noch langfristig auf fossile Kraftstoffe angewiesen, auch um in elektrifizierten Antriebskonzepten mit Unterstützung eines effizienten Verbrennungsmotors die hohen Mobilitätsbedürfnisse der Fahrzeugkunden zu erfüllen.

Literatur

AELFA, 2011. *AELFA Endbericht Strukturanalyse von Automobilkomponenten für zukünftige elektrifizierte Fahrzeugantriebe*, Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V..

AG-Energiebilanzen, 2012. *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2011*. [Online]

Available at: <http://ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=139>

[Zugriff am 7 August 2013].

bdew, 2011. *Positionspapier Erdgas als Kraftstoff*. [Online]

Available at:

[http://www.bdew.de/internet.nsf/id/905ACB64A577B2DAC125783E005C927D/\\$file/Positionspapier%20Erdgas%20als%20Kraftstoff.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/905ACB64A577B2DAC125783E005C927D/$file/Positionspapier%20Erdgas%20als%20Kraftstoff.pdf)

[Zugriff am 24 Juni 2013].

BMU, 2012. *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*, s.l.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

BMVBS, 2013. *Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung*, Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

Bundesnetzagentur, 2012. *Biogas-Monitoringbericht 2012*. [Online]

Available at:

http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2012/BioGasMonitoringbericht2012pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2

[Zugriff am 7 August 2013].

DLR & infas, 2008. *Mobilität in Deutschland - Ergebnisbericht*, Berlin: Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

EIA, 2013. *Annual Energy Outlook 2013*, Washington, D.C.: U.S. Energy Information Administration.

erdgas mobil, 2013. *erdgas mobil FAQ*. [Online]

Available at: <http://www.erdgas-mobil.de/ueber-uns/faq/>

[Zugriff am 07 30 2013].

EU, 2009. *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nu*, Brüssel: Europäische Union.

EU, 2011. *Durchführungsbeschluss der Kommission vom 20. Dezember 2011 zur Bestätigung der vorläufigen Berechnung der durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen und der Zielvorgaben für spezifische Emissionen für die Hersteller von Personenkraftwagen im Kalen*, Brüssel: Europäische Kommission.

EU, 2013. *Clean power for transport – Frequently asked questions*, Brussels: European Commission.

FNR, 2013. *Basisdaten Bioenergie*, Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V..

GGEMO, 2012. *Regierungsprogramm Elektromobilität*. [Online]

Available at: <http://www.bmu.de/fileadmin/bmu->

[import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_3_regierungsprogramm_bf.pdf](http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_3_regierungsprogramm_bf.pdf)

[Zugriff am 7 August 2013].

Hülsebusch, D., Ungethüm, J., Braig, T. & Dittus, H., 2009. Multidisciplinary simulation of Vehicles. *ATZ Worldwide Magazines*, no. 10/2009, pp. 50-55.

IEA, 2012. *World Energy Outlook*, Paris: International Energy Agency Publications.

- IER, et al., 2012. *Schlussbericht: Systemanalyse Erzeugung und Nutzung biogener Gase in Baden-Württemberg*, Stuttgart: Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg.
- IFEU, 2012. *"Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011)*, Heidelberg: ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- JRC, 2011. *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- KBA, 2011. *Fachartikel: Emissionen und Kraftstoffe Stand 15.03.2011*, s.l.: s.n.
- McKinsey, 2012. *Ein Portfolio von Antriebssystemen für Europa: Eine faktenbasierte Analyse*, s.l.: NOW GmbH.
- Mock, P., 2010. *Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR₂₁)*. Stuttgart: DLR Institut für Fahrzeugkonzepte.
- Redelbach, M., Klötzke, M. & Friedrich, H. E., 2012. *Impact of lightweight design on energy consumption and cost effectiveness of alternative powertrain concepts*. Brussels, European Electric Vehicle Congress.
- Rogers, E. M., 1995. *Diffusion of Innovations*. New York: The Free Press.
- UFOP, 2012. *Marktinformationen - Ölsaaten und Biokraftstoffe*, Berlin: Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V..
- Weisser, D., 2007. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy, Volume 32, Issue 9*, pp. 1543-1559.

Anhang

Tabelle 7: Die Rahmenannahmen für Energiepreise, Emissionsintensitäten und -regulierung

Szenarioparameter		Einheit	2010	2020	2030	2040	Quelle
Energiepreise	Ölpreis (Basisszenario)	[\$ ₂₀₁₁ /bbl]	107,6 (2011)	119,5	123,6	126,4	IEA, WEO 2012 New Policies Scenario
	Ölpreis (Hoch)	[\$ ₂₀₁₁ /bbl]		128,3	141,1	148,9	IEA, WEO 2012 Current Policies Scenario
	Ölpreis (Niedrig)	[\$ ₂₀₁₁ /bbl]		68,9	71,9	74,9	EIA, Annual Energy Outlook 2013
	CNG Steuer	[€ ₂₀₁₀ /kg]	0,44	ab 2019: 1,02			Gesetzgebung
	Elektrizitätspreis	[€ _{ct2010} /kWh]	20,0	28,4	32,4	33,0	BMU Leitszenario 2011 (inkl. Steuer, Umlagen)
	H ₂ -Preis	[€ ₂₀₁₀ /kg]	16,6	6,6	5,0	5,0	McKinsey Powertrain Coalition Study 2010
Energie- bereitstellung und Emissionen	CO ₂ -Intensität Elektrizität	[g/MJ]	152	88	55	26	BMU Leitszenario 2011 Szenario C
	CO ₂ -Intensität H ₂	[g/MJ]	100	73	21	8	McKinsey Powertrain Coalition Study 2010
CO ₂ -Regulierung	CO ₂ -Ziel (EU-Ebene)	[g CO ₂ /km]	2015: 130	95	70	45	Gesetzgebung Lineare Fortschreibung

Tabelle 8: Die Fahrzeugdimensionierung der elektrifizierten Antriebskonzepte

Antrieb	Klein		Mittel		Groß	
	Batterie [kWh]	Elektromotor [kW]	Batterie [kWh]	Elektromotor [kW]	Batterie [kWh]	Elektromotor [kW]
Otto						
Otto HEV	1	15	2	25	3	40
Otto PHEV	8	40	12	60	16	90
Otto REEV	10	65	15	100	20	160
Diesel						
Diesel HEV	1	15	2	25	3	40
CNG						
CNG HEV	1	15	2	25	3	40
BEV	20	65	25	100	nicht betrachtet	
FCEV	2	65	3	100	4	160

Tabelle 9: Auszug Technologiendatenbank mit differenzierten Effizienzpaketen (Beispiel für Mittelsegment, Ottomotor)

Beispiel: Mittleres Segment, Benzin

		Otto #01	Otto #02	Otto #03	Otto #04	Otto #05	Effizienzsteigerung		
A D D O N S	Reduced engine friction losses	2009	--	X	X	X	X	X	-3,0%
	Direct injection: homogeneous charge	2010	--		X	X	X		-2,0%
	Direct injection: stratified charge	2013	--				X		-8,0%
	Medium downsizing with turbocharging	2010	--		X	X			-5,0%
	Strong downsizing with turbocharging (twin charger)	2011	--			X	X		-8,0%
	Variable valve timing	2010	--			X			-3,0%
	Variable valve control	2012	--			X	X		-7,0%
	Start stop	2009	--	X	X	X			-4,0%
	Start stop + regenerative braking (micro hybrid)	2011	--			X	X		-7,0%
	Low friction tires	2009	--	X	X	X	X		-2,0%
	Optimised cooling circuit, electric water pump	2011	--		X	X	X		-2,0%
	Exhaust heat recovery	2012	--			X	X		-1,0%
	Improved aerodynamic efficiency	2012	--			X	X		-1,5%
	Electrically assisted steering, auxiliary power steering	2010	--		X	X	X		-2,0%
	Improved transmission (e.g. Dual-Clutch)	2011	--		X	X	X		-4,0%
	Weight reduction: package 1 (mild) = 1,5% veh. weight (20 kg)	2010	--		X	X			-1,0%
	Weight reduction: package 2 (medium) = 3,5% veh. weight (50 kg)	2011	--			X			-2,0%
	Weight reduction: package 3 (strong) = 9,0% veh. weight (120 kg)	2013	--				X		-5,0%

		Otto #01	Otto #02	Otto #03	Otto #04	Otto #05	Effizienzsteigerung	Kosten
Otto #01	2009	--	X				-8,0%	300 €
Otto #02	2010	--		X			-17,0%	870 €
Otto #03	2011	--			X		-24,0%	1.490 €
Otto #04	2012	--				X	-34,0%	2.645 €
Otto #05	2013	--				X	-40,0%	3.615 €

Tabelle 10: Identifikation der durchschnittlichen Fahrertypen

	Kleinwagen	Mittelklasse	Oberklasse
Otto-Fahrer	• Anteil 18%	• Anteil 46%	• Anteil 11%
Typischer Fahrer *	• Ø Jahresfahrleistung 11.000 km A1	• Ø Jahresfahrleistung 12.000 km B1	• Ø Jahresfahrleistung 13.000 km C1
Diesel-Fahrer	• Anteil 2%	• Anteil 16%	• Anteil 6%
Typischer Fahrer *	• Ø Jahresfahrleistung 20.000 km A2	• Ø Jahresfahrleistung 22.000 km B2	• Ø Jahresfahrleistung 23.000 km C2

* Auf Basis MiD 2008 Daten, Auswertung der statistischen Mittelwerte des Kundensegments differenziert nach Fahrzeuggröße und -antrieb; Anteil entspricht der Summe über alle Käufertypen

Tabelle 11: Neuzulassungszahlen in den alternativen Szenarien (in Mio.)

Jahr	BEV+PHEV+REEV	FC	HEV (Diesel+Otto)	Erdgas	Diesel	Otto
Basis-Szenario						
2020	0,04	0,05	0,43	0,02	1,66	0,90
2030	0,69	0,05	1,23	0,03	0,83	0,27
2040	2,00	0,06	0,35	0,00	0,67	0,03
Szenario CO2-Regulierung 70 g/km						
2020	0,04	0,05	0,43	0,02	1,66	0,90
2030	0,13	0,03	0,86	0,08	1,41	0,60
2040	0,95	0,03	1,11	0,02	0,87	0,12
Szenario CO2-Regulierung 95 g/km						
2020	0,04	0,05	0,43	0,02	1,66	0,90
2030	0,01	0,00	0,37	0,14	1,80	0,78
2040	0,01	0,00	0,30	0,18	1,83	0,79
Szenario Ölpreisvariante						
2020	0,04	0,05	0,41	0,02	1,68	0,89
2030	0,67	0,05	1,29	0,03	0,78	0,28
2040	2,11	0,06	0,37	0,00	0,56	0,01
Szenario Erdgas						
2020	0,04	0,05	0,35	0,15	1,59	0,91
2030	0,64	0,05	1,14	0,12	0,87	0,28
2040	1,89	0,05	0,34	0,03	0,76	0,04
Szenario Wasserstoff						
2020	0,04	0,04	0,41	0,02	1,67	0,91
2030	0,62	0,20	1,19	0,03	0,78	0,28
2040	1,65	0,22	0,39	0,00	0,78	0,06