

CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020

Abschlussbericht 113510

Institut für Kraftfahrzeuge Strategie und Beratung

Abschlussbericht

CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020

Projektnummer 113510

Auftraggeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Referat I C 4 Villemombler Str. 76 53123 Bonn

Projektleiter:

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Christian-Simon Ernst

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced and/or published without the previous written consent of ika. © ika

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein

Institutsleiter

Dipl.-Kfm. Ingo Olschewski

Geschäftsbereichsleiter Strategie und Beratung

Aachen, Dezember 2012

Inhalt

1	Ein	leitun	g	7
2	Me	thodis	che Vorgehensweise	8
3	Um	nfeldar	nalyse (AP1)	10
3	3.1	Aufsc	chlüsselung der CO ₂ -Emissionen in Europa	11
3	3.2	Legis	slative Rahmenbedingungen im Hinblick auf CO ₂ -Emissionen	11
	3.2.1	CC) ₂ -Gesetzgebung	12
	3.2	.1.1	Europäische Union	12
	3.2	.1.2	USA	16
	3.2	.1.3	Japan	18
	3.2.2	? Ric	chtlinien für die Messung von CO ₂ -Emissionen	20
	3.2	.2.1	Europäische Union	20
	3.2	.2.2	USA	21
	3.2	.2.3	Japan	22
	3.2.3	8 Ve	rgleich und Roadmap der CO ₂ -Gesetzgebungen	23
3	3.3	Fahrz	zeugmarkt-Analyse für Deutschland und die Europäische Union	25
	3.3.1	En	twicklung des Marktvolumens von Pkw (M1)	26
	3.3.2	2 En	twicklung der Fahrzeugsegmente	27
	3.3.3	B En	twicklung der Antriebskonzepte	31
3	3.4	Analy	se der CO ₂ -Segment- und Flottenemissionen in Europa	33
3	3.5	Entw	icklungs- und Produktionszyklen auf Fahrzeug- und Technologieebene	36
3	3.6	Zwisc	chenfazit	41
4	Ted	chnolo	ogische und wirtschaftliche Potenzialanalyse (AP2)	43
5	En	twicklu	ungsszenarien und Darstellung der CO ₂ -Reduktionspotenziale (AP3)	46
5	5.1	Zusa	mmenstellung von Technologiepaketen	46
	5.1.1	Te	chnologiebewertung	46
	5.1.2	? Te	chnologische Wechselwirkungen	48
	5.1.3	8 Me	thodik zur Ermittlung der Technologiepakete	49
	5.1.4	. Eir	nsparpotenziale der Technologiepakete	52

5.2	Entwicklungsszenarien und CO ₂ -Flottenreduzierungspotenziale	57
5.3	Einflussanalyse der Segment-/ Kraftstoffkombinationen	61
5.4	Zwischenfazit	62
6 Va	lidierung der bisherigen Ergebnisse durch Experteninterviews (AP4)	63
6.1	Methodische Vorgehensweise der Experteninterviews	63
6.2	Ergebnisse der Technologiebewertung	64
6.3	Ergebnisse der Marktprognose	66
6.4	Ergebnisse der offenen Fragen	67
6.5	Weitere Ergebnisse der Interviews	69
6.6	Zwischenfazit	70
7 Ab	leitung von CO ₂ -Zielwerten (AP5.1)	72
7.1	Methodische Vorgehensweise und Szenarienentwicklung	72
7.2	Einflussparameteranalyse für Wirtschaftlichkeitsanalyse (TCO)	74
7.2.1	Endkundenpreis der Technologien	74
7.2.2	2 Entwicklung des Kraftstoffpreises in der Europäischen Union	77
7.2.3	B Laufleistung von Fahrzeugflotten	78
7.2.4	Fahrzeughaltedauer	79
7.2.5	S Kapitalwertmethode	80
7.3	Modellierung der Szenarien	81
7.3.1	Modellierung der gewerblichen Kunden	81
7.3.2	Modellierung der privaten Kunden	83
7.3.3	Zwischenergebnisse der Marktmodellierung	85
7.4	CO ₂ -Flottenemissionen und CO ₂ -Zielwerte der EU-Neuzulassungen	86
7.5	Szenarioanalyse	88
7.6	Sensitivitätsanalyse	90
7.7	Zwischenfazit	90
8 Str	ategischen Implikationen für die deutsche Automobilindustrie (AP5.2)	93
8.1	Fahrzeughersteller	93
8.1.1	Berechnung von CO ₂ -Flottenwerten für abstrahierte Fahrzeughersteller	93
812	Handlungsfelder für Fahrzeughersteller	95

8.2	2 /	Automobilzulieferer		98
8.3	3 I	Hand	dlungsfelder Politik	100
9	Zusa	amm	enfassung	103
10	Ausl	blick	und zukünftiger Forschungsbedarf	107
11	Liter	atur		108
12	Ann	ang	A: Technologiebeschreibung	122
12	2.1 Ref		renzfahrzeuge	122
12	2.2	Hebe	el zur Reduzierung von Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen	123
12	2.3	Redu	uzierung des Energiebedarfs zum Fahrzeugbetrieb	126
-	12.3.1		Rollwiderstandsreduzierte Reifen	127
-	12.3.2	2	Leichtbau	128
-	12.3.3	3	Aerodynamische Optimierung	131
12	2.4	Effizi	enzerhöhung der Energiebereitstellung	134
-	12.4.1		Optimierung von konventionellen Verbrennungsmotoren	134
	12.4	.1.1	Direkteinspritzung	135
	12.4	.1.2	Gekühlte Abgasrückführung	137
	12.4	.1.3	Downsizing und Aufladung	138
	12.4	.1.4	Variabler Ventiltrieb	142
	12.4	.1.5	Zylinderabschaltung	144
	12.4	.1.6	Variable Verdichtung	145
	12.4	.1.7	Brennverfahren	146
	12.4	.1.8	Reibungsreduzierung	147
	12.4	.1.9	Reduzierung von thermischen Verlusten	147
-	12.4.2	2	Getriebe	149
-	12.4.3	}	Elektrifizierung des Antriebsstrangs	152
	12.4	.3.1	Hybridantrieb	153
	12.4	.3.2	Elektrofahrzeuge	157
-	12.4.4	ļ	Reduzierung des Energiebedarfs von Nebenverbrauchern	158
-	12.4.5	5	Alternative Kraftstoffe im Verbrennungsmotor	160
12	2.5	Sons	stige Maßnahmen und Ökoinnovationen	163

Inhalt	6
minait	

12	.6	Erfahrungsraten	164
13	Anl	hang B: Sonstiges	167

1 Einleitung 7

1 Einleitung

Die Europäische Kommission (EK) formuliert in ihrem Weißbuch "Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050" die Vision einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Ökonomie [EUR11b]. Zur Weichenstellung für dieses Ziel werden in diesem Weißbuch fünf Kernmaßnahmen formuliert, die im Wesentlichen auf der Emissionsreduzierung und Effizienzsteigerung in der Energienutzung in allen Wirtschaftssektoren basieren. Ein zentraler Stellhebel ist hierbei die Reduzierung der Kohlenstoffdioxid (CO₂) Emissionen, welche zum Klimawandel beitragen. Neben den Sektoren der Energiewirtschaft und der Industrie trägt der Straßenverkehr heute zu ca. 23 % der CO₂-Emissionen in der Europäischen Union (EU) bei [EUR10b].

Zur Umsetzung der langfristigen Vision einer CO₂-armen Gesellschaft hat die EU bereits in den vergangenen Jahren Maßnahmen und Fahrpläne für die kurz- bis mittelfristige Zukunft auf den Weg gebracht. So wurden bereits mit der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 Zielwerte für Personenkraftwagen (Pkw) und anschließend für leichte Nutzfahrzeuge (N1) beschlossen. Derzeit werden auf europäischer Ebene CO₂-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge diskutiert. Zukünftig ist zu erwarten, dass die Konsultationen auf weitere Fahrzeugsektoren, wie z.B. mittelschwere Nutzfahrzeuge (N2) oder Motorräder, ausgeweitet werden.

Seit dem 1. Januar 2012 ist die schrittweise Begrenzung der CO₂-Emissionen für Pkw in Kraft. Bereits ab 2015 sollen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der europäischen Pkw-Neuwagenflotte im Durchschnitt auf 130 g CO₂/km reduziert werden. Für das Jahr 2020 ist ein Flottenzielwert in Höhe von 95 g CO₂/km definiert. Die tatsächlichen CO₂-Zielwerte die ein Fahrzeughersteller einhalten muss sind an das Durchschnittsgewicht der Neufahrzeugflotte gekoppelt. Sofern ein Fahrzeughersteller seinen massenspezifischen Zielwert nicht einhält, werden entsprechend der Überschreitung Strafzahlungen fällig. Die deutsche Automobilindustrie verfügt klassischerweise über ein sehr breites Produktportfolio, so dass große, schwere und hoch motorisierte Fahrzeuge den Handlungsdruck zur Emissionsreduzierung stark intensivieren.

Das Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University wurde vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) beauftragt in der vorliegenden Studie zu untersuchen, welcher durchschnittliche CO₂-Zielwert für die europäische Neuwagenflotte für das Jahr 2020 technisch und wirtschaftlich realistisch erscheint. Dabei werden die spezifischen Emissionen in Abhängigkeit zum Bezugsparameter Gewicht analysiert. Weiterhin wird die laufende Überarbeitung des Verfahrens zur Messung der CO₂-Emissionen ebenfalls betrachtet sowie die zukünftig erwartete Flottenzusammensetzung prognostiziert. Abschließend werden die mit der Festlegung des CO₂-Zielwertes für 2020 verbundenen möglichen Auswirkungen auf die deutsche und europäische Automobil- und Zulieferindustrie untersucht.

2 Methodische Vorgehensweise

Ziel dieser Studie ist die Untersuchung des CO₂-Reduzierungspotenzials bei Pkw bis 2020 in Europa auf Basis einer technologischen und wirtschaftlichen Analyse. Die dieser Arbeit zugrunde liegende methodische Vorgehensweise wird in Abb. 2-1 graphisch zusammengefasst.

Im ersten Arbeitspunkt (AP1) wird das Umfeld der Automobilindustrie betrachtet. Dabei wird eine detaillierte Übersicht über die CO₂-Emissionsregularien für Pkw in der EU, USA und Japan, sowie die aktuelle sowie zukünftige EU-Marktentwicklung und die korrespondierende EU-Flottenzusammensetzung erstellt. Weiterhin wird eine Übersicht über die aktuellen Flottenverbräuche in Deutschland und Europa gegeben. Diese dient im Folgenden als Grundlage für die Berechnungen zur Bestimmung des CO₂-Zielwertes für das Jahr 2020.

Im zweiten Arbeitspunkt (AP2) werden zunächst Referenzfahrzeuge definiert, die den Stand der Technik im Jahr 2010 widerspiegeln. Anschließend werden die verschiedenen Technologien mit Potenzial zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der damit einhergehenden CO₂-Emissionen analysiert. Dabei werden insbesondere innovative Technologien zur Verbesserung der Effizienz des Antriebstrangs und zur Reduzierung der Fahrwiderstände fokussiert. In einer aggregierten Darstellung wird dabei das Potenzial der technologischen Einzelmaßnahmen den zu erwartenden Kosten gegenübergestellt.

Auf Basis der Detailuntersuchung der einzelnen technologischen Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen in AP2 werden im dritten Arbeitspunkt (AP3) diese Einzelmaßnahmen auf eventuelle Wechselwirkungen mit anderen Maßnahmen untersucht. Anschließend werden sie gemäß der zu erwartenden technologischen und wirtschaftlichen Einsatzwahrscheinlichkeit zu stufenmäßig aufeinander aufbauenden Entwicklungsszenarien zusammengestellt. Da sich viele der zu untersuchenden Technologien heute noch im frühen Entwicklungsstadium befinden, wird zudem je Szenario eine Bewertung des realistischen Zeithorizonts für eine Serienreife durchgeführt. Des Weiteren wird die Höhe der Mehrkosten je Entwicklungsstufe der erwarteten Kraftstoffeinsparung gegenübergestellt und somit die Technologieattraktivität für OEM und Endkunden aufgezeigt.

Zur Validierung der Ergebnisse der vorangegangen Arbeitspunkte sind im vierten Arbeitspunkt im Rahmen einer Primärdatenerhebung Telefoninterviews mit Experten der Automobilindustrie sowie in einem Workshop beim VDA durchgeführt worden.

Auf Basis der vorangegangenen Analysen wird im letzten Arbeitspunkt (AP5) ein CO₂-Zielwert für die europäische Pkw-Neuwagenflotte in 2020 abgeleitet, der technologisch und wirtschaftlich realistisch ist. Hierbei wird ein Schwerpunkt auf die realistische Marktpenetration der analysierten Technologiepakete gelegt. Des Weiteren werden basierend auf den gesammelten und verifizierten Ergebnissen strategische Implikationen für die deutsche Automobilindustrie (mit Fokus auf Pkw) abgeleitet.

AP1

- Umfeldanalyse
 - Legislative Umfeldbetrachtung
 - Marktentwicklung / Marktzusammensetzung
 - Entwicklungs- und Produktionszyklen

AP2

- Technologische und wirtschaftliche Potenzialanalyse
 - Aggregierte Darstellung der technologischen Einzelmaßnahmen

AP3

■ Ableitung von Entwicklungsszenarien und Darstellung der CO₂-Reduktionspotenziale

AP4

Validierung der bisherigen Ergebnisse durch Experteninterviews

AP5

- Ableitung von CO₂-Zielwerten sowie strategischer Implikationen für die deutsche Automobilindustrie (Fokus Pkw)
 - CO₂-Zielwert für die europäische Pkw-Flotte
 - Implikationen für deutsche OEM
 - Implikationen für deutsche Zulieferer
 - Handlungsfelder für die Politik

Abb. 2-1: Methodische Vorgehensweise

3 Umfeldanalyse (AP1)

In diesem Kapitel wird das Umfeld der Automobilindustrie im Zusammenhang mit der Reduzierung von CO₂-Emissionen analysiert. Zu Beginn soll die Bedeutung von CO₂-Emissionen für die Automobilindustrie in den Gesamtkontext eingeordnet werden.

Die Automobilindustrie steht derzeit vor einem Paradigmenwandel. Die aktuelle Veränderung der Rahmenbedingungen führt dazu, dass der Lösungsraum bei der Konzeption und Auslegung zukünftiger Kraftfahrzeuge erweitert werden muss, siehe Abb. 3-1. Die zentralen Herausforderungen bzw. Megatrends stellen hierbei steigende Emissionen im Kontext des Klimawandels sowie die endliche Verfügbarkeit von fossilen Kraftstoffen dar. Außerdem sind der demografische Wandel in Form einer Verschiebung von Altersstrukturen sowie der Urbanisierung zentrale Faktoren. Diese Herausforderungen wirken auf Industrie, Politik und Gesellschaft, welche in der Folge eine Veränderung der Mobilität durch strengere Gesetze, sich ändernde Markt- und Kundenanforderungen und eine forcierte Energiewende bewirken. Daraus resultieren drei wesentliche Handlungsfelder, die von alternativen Antriebskonzepten über effiziente und sichere Energiespeicher bis hin zu innovativen Fahrzeugkonzepten führen. Der zentrale Fokus dieser Studie richtet sich auf den Treiber CO₂-Gesetzgebung und die daraus resultierenden Herausforderungen für zukünftige Fahrzeugkonzepte [ADL09][DTT09].



Abb. 3-1: Megatrends, Treiber und Lösungsraum im Umfeld der Automobilindustrie

Im Folgenden wird zum Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge das Ursache-Wirkungsprinzip zwischen CO₂-Emissionen und Klimawandel erläutert. Darauf aufbauend werden die CO₂-Gesetzgebungen und Richtlinien zur Messung von CO₂-Emissionen in den wichtigsten Absatzmärkten betrachtet und verglichen. Anschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der Zusammensetzung und Entwicklung der Fahrzeugmärkte in Deutschland und Europa sowie der dazugehörigen Antriebskonzepte und CO₂-Flottenemissionen. Bei dieser Betrachtung wird sowohl auf einzelne Fahrzeugsegmente als auch auf die wichtigsten Fahr-

zeughersteller in Europa eingegangen. Schließlich werden die Entwicklungszyklen auf Fahrzeug- und Technologieebene untersucht, um abhängig von der Komplexität einer neuen Technologie Zeithorizonte für die Entwicklung und Fahrzeugintegration zu ermitteln.

3.1 Aufschlüsselung der CO₂-Emissionen in Europa

Das Klima unserer Erde hat sich in den vergangenen Jahrzehnten konstant erwärm. Als wesentliche Verursacher dieses Temperaturanstiegs werden anthropogene, d.h. vom Menschen verursachte, CO₂-Emissionen verantwortlich gemacht. Daher muss in einem ganzheitlichen Ansatz nach Wegen und Methoden gesucht werden die CO₂-Emissionen global und nachhaltig zu reduzieren.

Der größte Emittent anthropogener CO₂-Emissionen in der EU ist mit 38 % die Energiewirtschaft. Der Verkehrs- bzw. Transportsektor trägt mit einem Anteil von 23 % zu den Emissionen bei, wobei davon 60 % auf den Pkw- und sonstigen Personenverkehr entfallen. Der Industriesektor ist in Europa für 22 % der CO₂-Emissionen verantwortlich. Weitere Emissionen werden durch Haushalte und Kleinverbraucher, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sowie Land- und Forstwirtschaft verursacht [EUR10b]. Zur Bekämpfung des Klimawandels müssen somit vor allem die Energiewirtschaft, der Transportsektor sowie die Industrie ihre CO₂-Emissionen reduzieren.

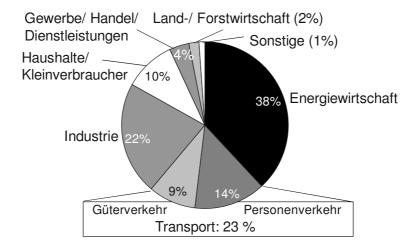


Abb. 3-2: CO₂-Emissionen in Europa (EU27) in 2007 aufgeschlüsselt nach Sektoren [Datenbasis: [EUR10b]]

3.2 Legislative Rahmenbedingungen im Hinblick auf CO₂-Emissionen

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Sicherung der Rohstoffressourcen sind in den Kernmärkten der Automobilindustrie verschiedene legislative Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen von Pkw eingeführt worden. Im Folgenden werden die aktuellen und zukünftigen CO₂-Gesetzgebungen in der Europäischen Union, den USA und Japan untersucht. Daraufhin folgt eine Betrachtung der den Gesetzgebungen zu Grunde liegenden Richtlinien und Fahrzyklen zur Messung von CO₂-Emissionen. Schließlich werden die legis-

lativen Rahmenbedingungen miteinander verglichen und unter Berücksichtigung der für die Zukunft prognostizierten Entwicklung der Zielvorgaben in einer Roadmap zusammengefasst.

3.2.1 CO₂-Gesetzgebung

In den folgenden Unterkapiteln wird die Gesetzgebung für die Europäische Union, die USA, und Japan detailliert beschrieben. Dabei existieren Regulierungsformen, die direkt oder indirekt, über den zum CO₂-Ausstoß proportionalen Kraftstoffverbrauch oder die Kraftstoffeffizienz, eine Senkung der CO₂-Emissionen zum Ziel haben. Beide Ausprägungen werden in dieser Studie unter den Begriff CO₂-Gesetzgebung zusammengefasst.

3.2.1.1 Europäische Union

Die Europäische Union (EU) hat sich bereits 1997 in dem globalen Abkommen des Kyoto-Protokolls verpflichtet, die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen der Jahre 2008 bis 2012 gegenüber dem Basisjahr 1990 um 8 % zu reduzieren. Dabei müssen die Mitgliedsstaaten der EU abhängig von ihrer Leistungsfähigkeit unterschiedliche Beiträge leisten. Deutschland hat sich zu einer Reduzierung um 21 % verpflichtet. Aufgrund eines noch ausstehenden Kyoto-Nachfolgeabkommens gibt es für den Zeitraum nach 2012 bisher keine bindenden internationalen Verpflichtungen.

Unabhängig davon hat die Europäische Kommission in einem Strategiepapier, dem sogenannten Weißbuch, festgelegt, welchen Beitrag Europa leisten sollte, um den weltweiten Temperaturanstieg auf unter 2 °C zu begrenzen. Dazu will die EU ihre CO₂-Emissionen bis 2050 um 80 % bis 95 % gegenüber 1990 reduzieren, wobei jeder der verursachenden Sektoren hierzu einen Beitrag leisten soll. Da der Verkehrssektor eine wesentliche und derzeit noch stetig wachsende Quelle darstellt, hat sich die EU das Ziel gesetzt, im Verkehrssektor bis 2030 eine Emissionsminderung von 20 % gegenüber dem Stand von 2008 zu erreichen. Einen Beitrag dazu soll die Regulierung der CO₂-Emissionen von Pkw liefern [EUR11b].

Bereits 1998 wurden erste Anstrengungen zur Festlegung von legislativen Rahmenbedingungen unternommen. Statt eines verbindlichen Grenzwertes einigte man sich jedoch auf eine freiwillige Selbstverpflichtung des Verbandes der europäischen Autohersteller (ACEA), den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß aller Neuzulassungen in der EU bis 2008 auf 140 g CO₂/km zu senken [VCD08]. Jedoch konnte erst 2010 ein durchschnittlicher CO₂-Ausstoß von 140,5 g CO₂/km erreicht werden [TAE11].

Vor diesem Hintergrund wurde 2009 die Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen Parlaments und des Rates zur Verminderung der CO₂-Emissionen von Pkw verabschiedet, die Anfang 2012 in Kraft getreten ist. In ihr wird ein durchschnittlicher spezifischer CO₂-Ausstoß von 130 g CO₂/km als Zielvorgabe für die europäische Flotte der Pkw-Neuzulassungen festgelegt im Jahr 2015. Für jeden Hersteller gilt dabei ein individueller Grenzwert für seine CO₂-Flottenemissionen, die von der durchschnittlichen Masse seiner Neufahrzeugflotte abhängig ist, siehe Abb. 3-3 und Gl. 3-1.

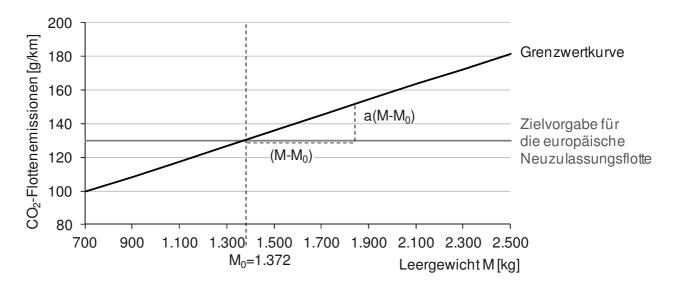


Abb. 3-3: EU-Verordnung zur Reduzierung der CO₂-Emissionen der Neuwagenflotte

$$CO_{2,Ziel}(M) = 130 + a (M - M_0)$$

Gl.3-1 [EUR09a]

a = 0.0457

M = Masse der durchschnittlichen fahrbereiten Neufahrzeugflotte [kg]

 $M_0 = 1.372,0 \text{ kg}$

Als Hersteller gilt dabei derjenige Akteur, der gegenüber der EG-Genehmigungsbehörde für alle Belange des Typgenehmigungsverfahrens sowie für die Sicherstellung der Übereinstimmung der Produktion verantwortlich ist.

Ende 2014 und anschließend alle weiteren drei Jahre wird die Bezugsmasse M₀ anhand der durchschnittlichen Masse der vergangenen drei Jahre überprüft und für die Folgejahre angepasst. Die angegebene Bezugsmasse M₀ gilt somit vorerst für den Zeitraum 2012 bis 2015 [EUR09a]. Für eine Darstellung der Entwicklung des Leergewichts der europäischen Fahrzeugflotte siehe Abb. 13-4 im Anhang.

Außerdem wurde ein "Phase-in", also eine Übergangsphase, vorgesehen, durch welche zwischen 2012 und 2015 zunächst nur ein Teil der Neuzulassungen des Herstellers die jeweiligen Grenzwerte einhalten muss, vgl. Abb. 3-4.

Abb. 3-4: Phase-in der CO₂-Zielvorgaben für die europäische Neuwagenflotte [In Anlehnung an [WAL11]]

Zusätzlich zur CO₂-Zielvorgabe für den Durchschnitt der europäischen Neuwagenflotte in Höhe von 130 g CO₂/km sollen in einem sogenannten integrierten Ansatz weitere 10 g CO₂/km durch sonstige technische Maßnahmen erreicht werden. Die Europäische Kommission zählt zu diesen sonstigen Maßnahmen die Effizienzsteigerung von Klimaanlagen sowie den Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen, Leichtlaufreifen, Gangwechsel-Anzeigen und Biokraftstoffen [EUR09a][BMU09].

Bis 2015 soll mit Hilfe dieser Regelung der durchschnittliche CO₂-Ausstoß der gesamten europäischen Neuwagenflotte auf 120 g CO₂/km abgesenkt werden. Langfristig wird für 2020 in der Verordnung ein Ziel von 95 g CO₂/km angestrebt [EUR09a].

Weicht ein Hersteller von seinem Grenzwert für die durchschnittlichen spezifischen Emissionen seiner Fahrzeugflotte ab, so fallen abhängig von der Überschreitung ansteigende Strafzahlungen an, siehe Abb. 3-5. Diese Berechnung wird auf drei Dezimalstellen genau durchgeführt. Während bei weniger als 1 g CO₂/km Überschreitung diese zusätzlichen CO₂-Emissionen mit 5 €/g pro Fahrzeug bestraft werden, betragen die Strafzahlungen bei mehr als 3 g CO₂/km Überschreitung bereits 95 €/g [EUR09a].

Exemplarische Rechnungen haben gezeigt, dass unter der Annahme eines Stillstands bei den CO₂-Flottenemissionen Strafzahlungen für deutsche Premium-Hersteller in Milliardenhöhe anfallen könnten. Diese enormen finanziellen Belastungen bei Nicht-Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte verdeutlichen den Einfluss der europäischen CO₂-Gesetzgebung auf die Forschung-/ und Entwicklung in der Automobilindustrie.

Abb. 3-5: Berechnung der Strafzahlungen pro Neuzulassung bei Grenzwertüberschreitung

Darüber hinaus existieren in der Verordnung Sonderregelungen, welche die Flexibilität für die Fahrzeughersteller über die Mittelung der einzelnen Fahrzeuge hinaus in der Übergangszeit weiter erhöhen. So besteht nach EU-Verordnung Nr. 443/2009 die Möglichkeit, sich den Einsatz sogenannter Ökoinnovationen mit bis zu 7 g CO₂/km auf die individuelle Zielvorgabe anrechnen zu lassen. Die Anerkennung von Ökoinnovationen ist an folgende Kriterien gebunden:

- Die resultierende CO₂-Einsparung muss bei 1 g CO₂/km oder mehr liegen.
- Die Technologie muss wesentlich zur Transportfunktion des Fahrzeugs und entscheidend zur Verbesserung des gesamten Energieverbrauchs des Fahrzeugs beitragen.
- Die resultierende Emissionsreduzierung kann nicht nach dem standardisierten Prüfzyklus erfasst werden.
- Die Technologie stellt keine Maßnahmen aus dem EU-Gesamtkonzept zur Zielerreichung von 120 g CO₂/km dar (Effizienzsteigerung von Klimaanlagen, Reifendruckkontrollsysteme, Leichtlaufreifen, Gangwechsel-Anzeigen, Biokraftstoffe).
- Die Technologie ist neu auf dem Markt in Bezug auf das Jahr 2009 (Ausstattung der Neuzulassungen 2009 kleiner als 3 %).

Von der Industrie werden als Beispiele für Ökoinnovationen 6-Gang-Schaltgetriebe, "eco mode" Getriebe, LED Leuchten, Kommunikations-, Navigations- und Fahrerinformationssysteme, Tempomat und Solar-Glasdächer genannt [BMU09]. Diese Regelung gilt nur bis zur Einführung eines neuen CO₂-Prüfverfahrens und soll 2015 neu bewertet werden [EUR11a].

Außerdem wurde ein Bonus für besonders emissionsarme Fahrzeuge vorgesehen. Pkw, die weniger als 50 g CO₂/km emittieren, dürfen 2012 und 2013 als 3,5 Fahrzeuge, 2014 als 2,5 Fahrzeuge und 2015 als 1,5 Fahrzeuge in die Flottenemissionswerte eingerechnet werden. Nach dem aktuellen Stand der Technik ist dieser Wert nur von Elektrofahrzeugen und Plug-

in-Hybriden zu erreichen. Als Plug-in-Hybride werden solche Hybridfahrzeuge bezeichnet, welche sich extern mit elektrischer Energie aufladen lassen. Zwecks Förderung von Biokraftstoffen dürfen außerdem die gemessenen CO₂-Emissionen von E85-Fahrzeugen bis Ende 2015 um 5 % verringert werden. Damit sind solche Fahrzeuge einbezogen, die mit einem Bioethanolgehalt von 85 % betrieben werden können. Diese Regelung ist auf Mitgliedsstaaten der EU beschränkt, die diesen Kraftstofftyp in 30 % ihrer Tankstellen anbieten und die gemeinschaftlich vorgeschriebenen Nachhaltigkeitskriterien erfüllen [EUR09a].

Fahrzeughersteller, die zusammen mit ihren verbundenen Unternehmen zwischen 10.000 und 300.000 Einheiten in der EU absetzen, können eine Ausnahmeregelung beantragen. In diesem Fall wird ein eigener spezifischer Grenzwert, definiert als 25 % Reduktion gegenüber 2007er Referenz, festgelegt. Ein Unternehmen gilt als verbunden, wenn der Hersteller über mehr als die Hälfte der Stimmrechte des Unternehmens verfügt, mehr als die Hälfte des Aufsichtsrats, des Verwaltungsorgans oder der gesetzlichen Vertretung stellt oder das Recht hat, die Geschäfte des Unternehmens zu führen [EUR09a].

Kleine Fahrzeughersteller mit weniger als 10.000 Einheiten haben ebenfalls die Möglichkeit, eine Ausnahme von der Grenzwertregelung zu beantragen. Diese können einen eigenen Vorschlag zu einem CO₂-Minderungsprogramm vorlegen, welcher nach erfolgter Prüfung und Genehmigung durch die Kommission eingehalten werden muss. Dazu darf dieser Hersteller oder ggf. eine Marke nicht Teil eines verbunden Unternehmens sein oder muss eine eigene Produktions- und Konstruktionsabteilung besitzen. Unter die Grenze von 10.000 Einheiten fallen in Europa zurzeit vor allem kleine Sportwagenhersteller sowie chinesische Fahrzeughersteller [ACE11a].

Hersteller innerhalb und außerhalb verbundener Unternehmen, die die Ausnahmeregelungen nicht in Anspruch nehmen können, haben darüber hinaus die Möglichkeit, sich in Emissionsgemeinschaften mit anderen Herstellern zusammenzuschließen, so dass diese eine gemeinsame Zielvorgabe erreichen müssen [EUR09a].

3.2.1.2 USA

In den USA werden CO₂-Emissionen seit 1975 indirekt über die Kraftstoffeffizienz in "miles per gallon" (mpg) durch den sogenannten "Corporate Average Fuel Economy (CAFE)" Standard reglementiert. Die Zielsetzung war bis 2010 jedoch hauptsächlich, die Abhängigkeit von Ölimporten in die Vereinigten Staaten zu reduzieren [PEW11][EPA11a]. Unter den CAFE-Standard fallen alle sogenannten Light Duty Vehicles (LDV), welche Passenger Cars und Light Duty Trucks unter 3.856 kg zulässigem Gesamtgewicht einschließen. Für Light Duty Trucks (LDT), per Definition neben leichten Nutzfahrzeugen auch alle geländegängigen Fahrzeuge, Pick-Ups und Sport-Utility-Vehicle (SUV), gelten dabei abgeschwächte Zielvorgaben. Sogenannte Passenger Cars (PC), also alle Pkw nach europäischem Verständnis mit Ausschluss von Geländewagen, müssen schärfere Vorschriften einhalten.

Bei einer Unterschreitung der CAFE-Vorgabe müssen vom Hersteller Strafzahlungen entrichtet werden. Diese liegen typischerweise bei einigen 100 € pro Fahrzeug [HAN11][NHA11] [PEW11].

Gegen den Protest der Automobilhersteller wurde 2007 durch das California Air Resources Board (CARB) mit dem Clean Cars Law erstmals ein Gesetz zur Festlegung von Treibhausgas-Emissionen von Fahrzeugen in Kraft gesetzt. Durch den Federal Clean Air Act ist der Bundesstaat berechtigt, Luftemissionen von Fahrzeugen eigenständig zu regulieren. Nach der Freigabe für diese eigene Regelung in Kalifornien, übernahmen auch weitere Staaten diese Regelung [PEW11].

Im April 2010 wurden schließlich die bundesstaatlich partiell geltenden Regulierungen von Treibhausgas-Emissionen und die nationale Gesetzgebung für die Kraftstoffeffizienz harmonisiert sowie abgestimmte nationale Regelungen für 2012 bis 2016 festgelegt. Darin reguliert die "National Highway Traffic and Safety Administration" (NHTSA) die Kraftstoffeffizienz, d.h. die CAFE-Standards, und die "Environmental Protection Agency" (EPA) die Standards für Treibhausgas-Emissionen. In den USA existieren somit derzeit noch zwei parallele, wenn auch hinsichtlich der Zielwerte abgestimmte, Gesetzgebungen für die Kraftstoffeffizienz und für die Treibhausemissionen von Pkw [PEW11].

Beide Regulierungen basieren auf der Fahrzeugstandfläche, so dass jedes Fahrzeug abhängig von seiner Größe jeweils eine CO₂-Zielvorgabe und eine Zielvorgabe für die Kraftstoffeffizienz zugewiesen bekommt. Darauf basierend werden für jeden Hersteller individuelle, nach Produktionsvolumina gewichtete, Flottengrenzwerte berechnet [PEW11]. Abb. 3-6 zeigt die zwischen 2012 und 2016 zunehmend schärferen CO₂-Grenzwertkurven für Passenger Cars und Light Duty Trucks.

Für die mit europäischen Pkw vergleichbaren Passenger Cars soll durch die EPA Regulierung bis 2016 für die USA ein CO₂-Flottendurchschnitt in Höhe von 224 g/mi entsprechend 38 mpg im US-Fahrzyklus erreicht werden. Dies entspricht einem CO₂-Ausstoß von ca. 160 g CO₂/km nach dem europäischen Fahrzyklus [PEW11][ICC11c].

Abb. 3-6: US-CO₂-Grenzwertkurven für Light Duty Vehicles 2012-2016 [EPA11a]

Bei Überschreitung des individuellen Hersteller-Grenzwertes gibt es keine Möglichkeit Strafzahlungen zu leisten. An Stelle dessen wird dem oder den verursachenden Fahrzeugen kein Zertifikat erteilt. Bei stattfindenden Verkäufen dieser Fahrzeuge kann es zur Beantragung eines Unterlassungsverfahrens kommen und es können Strafen bis zu 37.500 US-\$ pro Fahrzeug erlassen werden [EPA10a].

Ähnlich der Verordnung in Europa wurden die Regelungen flexibel gestaltet, da an Stelle der Regulierung einzelner Fahrzeuge der Herstellerdurchschnitt reguliert wird. Außerdem können bei Unterschreitungen des Grenzwertes Bonuspunkte gesammelt und zwischen den Herstellern gehandelt werden. Weitere Bonuspunkte können z.B. durch besonders sparsame Fahrzeuge, fortschrittliche Technologien, optimierte Klimaanlagen oder den Einsatz von Biokraftstoffen gewonnen werden. Des Weiteren wurden weitere Erleichterungen für Hersteller wie z.B. Porsche vorgesehen, die nur wenige Fahrzeuge in den USA absetzen und die aufgrund eines speziellen Fahrzeug-Portfolios die Ziele nicht erreichen können. Diese Sonderregelungen gelten nur bis Ende 2015 [EPA11a] [PEW11]. Derzeit werden von den Behörden EPA, NHTSA und dem Staat Kalifornien Potenziale und Kosten von Technologien zur CO₂-Reduzierung ermittelt, um für den Zeitraum 2017 bis 2025 eine Nachfolgeregelung zu finden [EPA11b].

3.2.1.3 Japan

In Japan erfolgt seit 2005 eine CO₂-Emissionsregulierung indirekt über eine Reglementierung der Kraftstoffeffizienz. Derzeitig müssen Grenzwerte eingehalten werden, die 2010 in Kraft getreten sind. Eine 2007 neu eingeführte Richtlinie reglementiert zudem den zu erreichenden Fahrzeugflottendurchschnitt eines Herstellers für das Jahr 2015. Bei den Gesetzesvorgaben fallen einzelne Fahrzeuge in Gewichtskategorien, welche jeweils die zu erreichende Kraftstoffeffizienz vorgeben. Ein Fahrzeughersteller muss mit seinen Fahrzeugen in der

jeweiligen Gewichtskategorie die Grenzwerte im Durchschnitt einhalten [ICC11c]. Abb. 3-7 zeigt die derzeit gültigen Grenzwerte im Vergleich mit den beschlossenen Grenzwerten für 2015 sowie den entsprechenden Zielwert für die japanische Flotte.

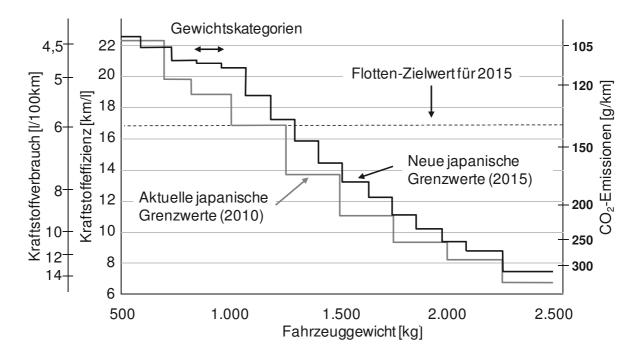


Abb. 3-7: Gewichtskategorien für die Kraftstoffeffizienzvorgaben in Japan [ICC07]

Neben der Verschärfung der Grenzwerte wird deutlich, dass für 2015 eine höhere Anzahl an Gewichtskategorien implementiert wurde. Diesel und Benzin Fahrzeuge werden nach der geltenden Richtlinie in derselben Kategorie mit gleichen Grenzwerten zusammengefasst. Allerdings muss aufgrund des höheren Heizwertes bei Dieselfahrzeugen die im Zyklus gemessene Kraftstoffeffizienz durch eine Division mit dem Faktor 1,10 korrigiert werden [DIE11].

Zur Grenzwertermittlung wurde die "Top Runner" Methodik verwendet. Hierbei basieren die Grenzwerte auf den Fahrzeugen, die hinsichtlich der Kraftstoffeffizienz eine "best-in-class" Position vorweisen können [GFE11]. Werden die geplanten Ziele für 2015 erreicht, so wird der japanische Flottendurchschnitt im japanischen Fahrzyklus auf 139 g CO₂/km gesenkt bzw. auf 16,8 km/l erhöht werden können. Dies entspricht ca. einem CO₂-Ausstoß von 125 g CO₂/km im NEFZ. Bei Verfehlung der derzeit gültigen Ziele für die Kraftstoffeffizienz fallen zwar Strafzahlungen an, diese sind jedoch vergleichsweise gering [ICC11c].

Derzeit erfolgt auch in Japan ein Prozess zur Ausarbeitung eines Gesetzes mit entsprechenden Grenzwerten für 2020 [ICC11a].

3.2.2 Richtlinien für die Messung von CO₂-Emissionen

Die Werte für die CO₂-Emissionen eines Kraftfahrzeugs werden im Rahmen der Typprüfung ermittelt, welche zur Erteilung der allgemeinen Betriebserlaubnis für einen Fahrzeug- bzw. Motortyp benötigt wird. Dazu werden Fahrzyklen unter definierten Randbedingungen auf einem Rollen-Prüfstand nachgefahren. Unter einem Fahrzyklus wird dabei ein Fahrmuster verstanden, welches anhand einer Abfolge von Geschwindigkeiten als Funktion der Zeit die Nutzung eines Fahrzeugs simuliert [BOS07][SHA10].

3.2.2.1 Europäische Union

Die Messung der CO₂-Emissionen bzw. des Kraftstoff- oder Stromverbrauchs bei der Typzulassung in Europa legt die Richtlinie ECE-R101 fest [EUR07]. Zur Verbrauchs- und Emissionsmessung wird hier der "Neue Europäische Fahrzyklus" (NEFZ) genutzt. Der NEFZ besteht aus vier Stadtzyklen und einem außerstädtischen Zyklus, siehe Abb. 3-8.

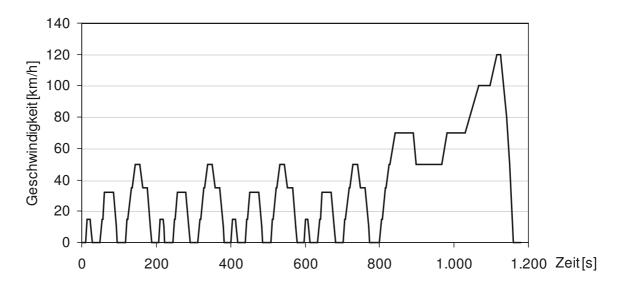


Abb. 3-8: Geschwindigkeitsprofil des neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) [TÜV05]

Zu den vorgeschriebenen Parametern gehören die Umgebungstemperatur, die Zuladung, ein Kaltstart des Motors, die Schaltpunkte, der Beginn der Abgasmessung und das Ausschalten aller Verbraucher [VOL09][EUR07]. Der Prüfzyklus besteht aus Beschleunigungs-, Verzögerungs-, Konstant- und Leerlaufphasen. Das Getriebe wird dabei an genau festgelegten Punkten geschaltet, wobei Automatikgetriebe auf der höchsten Fahrstufe zu betreiben sind. Die gesamte Zyklusdauer beträgt ca. 20 min und es wird eine Fahrstrecke von ungefähr 11 km bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit, inklusive Leerlaufphasen, von 33,6 km/h zurückgelegt. Die maximale erreichte Geschwindigkeit beträgt 120 km/h [ADA11][EUR07].

Auch Hybrid- und Elektrofahrzeuge durchfahren diesen Zyklus. Plug-in-Hybride müssen das Verfahren einmal mit vollständig geladenen und einmal mit einem leeren Energiespeicher absolvieren. Anschließend werden die gemessenen Verbräuche bzw. Emissionen gemittelt.

Für Elektroautos werden keine Emissionen gemessen. Sie gelten nach der derzeitig gültigen Richtlinie als emissionsfrei [EUR07].

Viele Experten fordern eine Überarbeitung des Fahrzyklus, da dieser weder einen realistischen Verbrauch im Alltag, noch den tatsächlichen Spritverbrauch, vor allem von Hybridfahrzeugen erfasse [HEI11][ZEI11]. Untersuchungen bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren haben ergeben, dass z.B. Fahrzeugvarianten und unterschiedliche Fahrzeugausstattungen deutliche Einflüsse auf die CO₂-Emissionen und den Kraftstoffverbrauch haben können. Eine besondere Wirkung haben auch Nebenverbraucher wie z.B. Klimaanlagen. Da im Typzulassungsverfahren das Fahrzeug ohne Nebenverbraucher wie Klimaanlage, Licht, Audioanlage etc. betrieben wird, sind die CO₂-Emissionen des gleichen Typs im realen Verkehr oftmals ca. 15 % bis 20 % höher als im NEFZ [TÜV05].

Auch bei Elektrofahrzeugen und Plug-in-Hybriden werden noch Unzulänglichkeiten gesehen. Bislang wurden für diese Antriebsformen die bei der Erzeugung des Stroms entstehenden CO₂-Emissionen nicht eingerechnet. Nur bei vollständig regenerativ erzeugtem Strom fahren Elektrofahrzeuge jedoch vollständig emissionsfrei [HEI11].

3.2.2.2 USA

In den USA werden die CO₂-Emissionen von Pkw nach dem CAFE-Standard in einem innerstädtischen und außerstädtischen Fahrzyklus kombiniert im Verhältnis 55 zu 45 gemessen [EPA10a]. Der sogenannte City Cycle (FTP) ist 17,77 km lang, dauert ca. 31 min und die durchschnittliche Geschwindigkeit mit Leerlaufphasen beträgt 34,1 km/h. Es wird eine maximale Geschwindigkeit von 91,2 km/h erreicht, siehe Abb. 3-9.

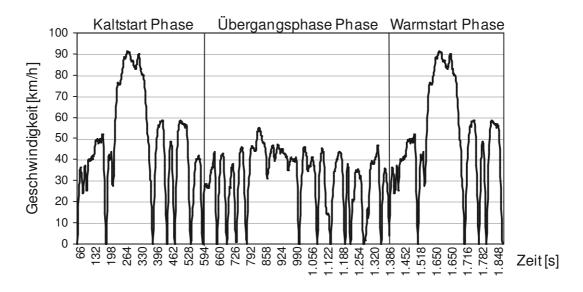


Abb. 3-9: Innerstädtischer US-Fahrzyklus (FTP) [EPA11c]

Der außerstädtische Highway Cycle (HFET) ist dagegen 16,5 km lang und dauert ca. 13 min, siehe Abb. 3-10. Die durchschnittliche Geschwindigkeit beträgt 77,7 km/h und die maximale Geschwindigkeit 96,4 km/h [EPA11c] [DEL11].

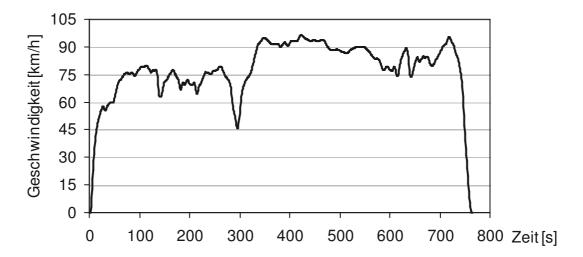


Abb. 3-10: Außerstädtischer US-Fahrzyklus (HFET) [EPA11c]

3.2.2.3 Japan

Die Messung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs in Japan wird für Fahrzeuge mit einem Leergewicht unter 3,5 t anhand des Prüfstands-Fahrzyklus JC08 durchgeführt, siehe Abb. 3-11. Der Test repräsentiert eine Fahrt im überfüllten Stadtverkehr mit Leerlaufperioden und häufigen Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen. Der JC08 ist seit Oktober 2011 nach einem Phase-in vollständig in Kraft getreten. Die Emissionen bzw. die Kraftstoffeffizienz werden jeweils im Kalt- und Warmstart gemessen und anschließend im Verhältnis 1:3 gewichtet [GFE11][DIE11]. Beim JC08 wird während der 20 minütigen Dauer eine Strecke von 8,2 km zurückgelegt, wobei eine Durchschnittsgeschwindigkeit ohne Leerlaufphasen von 24,4 km/h erreicht wird. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 81,6 km/h.

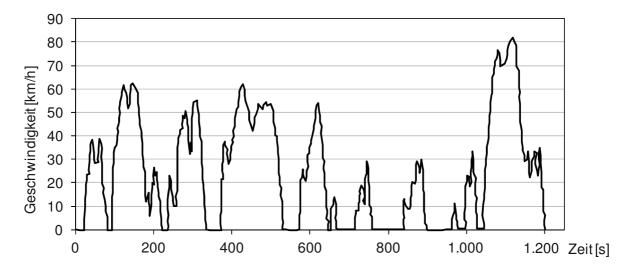


Abb. 3-11: Japanischer Fahrzyklus JC08 [DIE11]

In den betrachteten Märkten Europa, USA, Japan findet in den kommenden Jahren eine Verschärfung oder Einführung von CO₂-Emissionsgrenzwerten statt. Dabei gibt es Unterschiede in der Struktur der Regulierung, den Zielvorgaben, der Ausgestaltung von Sanktionen und Sonderregelungen sowie den Fahrzyklen für die Messung von Emissionen.

Die den Regulierungen zu Grunde liegenden Fahrzyklen variieren deutlich in der durchschnittlichen Geschwindigkeit, der maximalen positiven und negativen Beschleunigung sowie deren Frequenz. Als Anhaltspunkt gilt dabei, dass bis zu einem bestimmten Geschwindigkeitsniveau höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten im Vergleich geringere Verbrauchs- und Emissionswerte liefern. Außerdem gilt, dass in der Regel starkes und häufiges Beschleunigen zu höheren Testwerten führt. So liegen die CO₂-Emissionen beim japanischen JC08, abhängig von den Fahrzeugspezifikationen, ca. 15 % über dem europäischen NEFZ, wobei dieser wiederum ca. 12 % über dem kombinierten CAFE-Verfahren der USA liegt [ICC07]. Diese unterschiedlichen nationalen Formen der Emissions- bzw. Verbrauchsmessung von Fahrzeugen müssen bei Gegenüberstellung der CO₂-Grenzwerte und entsprechender Flottenzielwerte unbedingt beachtet werden.

Derzeit erfolgt eine Initiative der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) zur Erarbeitung eines verbraucherfreundlichen und global einheitlich anwendbaren Verfahrens zur CO₂- und Verbrauchsmessung. Die "Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure" (WLTP) wird, falls von den Ländern akzeptiert, weltweit einheitliche Bedingungen und Prüfzyklen zur Messung des Normverbrauchs, der CO₂-Emissionen und Schadstoffemissionen festlegen [HEI11]. Die Europäische Kommission plant das von der UNECE entwickelten Verfahren zu adaptieren [EUR10a]. Japan und die USA haben der Arbeitsgruppe ebenfalls ihre Unterstützung zugesagt. Die WLTP soll bis 2013 technisch fertig gestellt werden und könnte bereits 2014 beschlossen werden [HEI11]. Die Zielwerte für die EU, Japan, USA etc. werden aller Voraussicht nach weiterhin unterschiedlich sein.

Eine vergleichende Übersicht der im vorherigen Kapitel betrachteten Regelungen zeigt Abb. 3-12. Aufgrund unterschiedlicher Messzyklen wurde in der Darstellung auf NEFZ-Äquivalente zurückgegriffen. Dazu wurden die Ergebnisse einer Simulationsmethodik des International Council on Clean Transportation (ICCT) verwendet. Es ist zu beachten, dass die NEFZ-Äquivalente keine offiziellen Daten darstellen. Die strengsten Flottenzielwerte, die mit Hilfe einer derzeit geltenden Regelungen erreicht werden sollen, kann Europa vor Japan und den USA aufweisen. Bei einem Vergleich der Zielvorgaben mit dem Flottendurchschnitt des gewählten Basisjahrs 2009 zeigt sich, dass gerade in Europa und den USA eine hohe Senkung der CO₂-Flottenemissionen erreicht werden muss.

Für die Zeit nach den bereits beschlossenen Gesetzgebungen in der EU, USA und Japan laufen derzeit in allen Regionen Studien zur Festlegung von Zielvorgaben und entsprechender Rahmenbedingungen bis 2020.

Abb. 3-12: Vergleich CO₂-Gesetzgebung in EU, USA und Japan für Pkw

Die EU stellt mit einer Verschärfung um 21 % im Zeitraum von 2015 bis 2020 einen Wert von 95 g CO₂/km zur Diskussion, wobei die Rahmenbedingungen zur Erreichung dieses Ziels bis 2013 bekannt gegeben werden sollen [EUR09a]. In den USA wurden im September 2011 Szenarien veröffentlicht, die für Pkw von einer weiteren Absenkung der CO₂-Emissionen um 26 % von 2016 bis 2020 auf 121 g CO₂/km im NEFZ ausgehen [ICC11c]. In Japan steht dagegen eine Zielvorgabe für 2020 in Höhe von 105 g CO₂/km nach dem NEFZ im Raum, entsprechend einer Reduzierung um 16 % im Vergleich zu 2015.

In Abb. 3-13 werden die historischen CO₂-Flottenemissionen, die gültigen und zukünftig geplanten Zielvorgaben graphisch in einer Roadmap bis 2025 zusammengefasst. Dabei wird deutlich, dass die bereits in Kraft getretenen Zielvorgaben für den Zeitraum von 2015 deutlich zur Senkung der CO₂-Flottenemissionen beigetragen haben. Außerdem kann ab 2015 länderübergreifend eine weitere Verschärfung der geplanten Zielwerte beobachtet werden.

Abb. 3-13: Entwicklung der CO₂-Flottendurchschnitte und Roadmap der Zielvorgaben für Pkw bis ca. 3.5 t zul. GG: [In Anlehnung an [ICC11b]]

3.3 Fahrzeugmarkt-Analyse für Deutschland und die Europäische Union

In diesem Kapitel werden der deutsche und europäische Fahrzeugmarkt analysiert und miteinander verglichen. Dabei werden sowohl das Volumen als auch die Zusammensetzung der Neuzulassungen nach Fahrzeugsegmenten untersucht und ein Szenario für die zukünftige Entwicklung der Segmente bis 2020 entworfen. Des Weiteren wird die Entwicklung von Antriebskonzepten untersucht und deren Verteilung in 2020 abgeschätzt.

Als Basis für die folgenden statistischen Auswertungen dienen die offiziellen europäischen Neuzulassungsdaten der European Environment Agency (EEA) aus 2010 [EEA11]. Seit 2009 müssen die Mitgliedsstaaten der EU für jedes zugelassene Modell eine Zulassungsstatistik übermitteln, die den CO₂-Ausstoß sowie technische Daten wie die Fahrzeugmasse und den Radstand enthalten. Für eine Analyse des deutschen Fahrzeugmarktes wurde zusätzlich auf die Daten des deutschen Kraftfahrtbundesamt (KBA) zurückgegriffen [KBA11]. Darüber hinaus dienen Statistiken des International Council on Clean Transportation (ICCT) zu Neuzulassungszahlen der Vergangenheit der Identifizierung von bisherigen Entwicklungen und Trends [ICC11d]. Zusätzlich werden bei dem Entwurf von Szenarien für den deutschen und europäischen Fahrzeug-Markt in 2020 auch Prognosen verschiedener Marktstudien herangezogen.

3.3.1 Entwicklung des Marktvolumens von Pkw (M1)

Der europäische Fahrzeugmarkt kam zwischen 2001 und 2007 auf ein Marktvolumen von über 15 Mio. Neuzulassungen pro Jahr. Ab 2007 haben sich die Neuzulassungen in Europa dagegen leicht rückläufig entwickelt, siehe Abb. 3-14. Als maßgebliche Ursache hierfür gilt vor allem die Finanz- und Wirtschaftskrise [ABD11c].

Deutlich erkennbar ist außerdem der Einfluss der Abwrackprämie in Deutschland in 2009, die in diesem Jahr zu einer Absatzsteigerung führte und die Nachfrage aus den Folgejahren vorzog. Die deutsche Abwrackprämie subventionierte mit einer Prämie i.H.v. 2.500 € vor allem den Kauf von kleineren bzw. günstigeren Fahrzeugen [STE11]. Auch in anderen Ländern Europas z.B. Frankreich, England, Spanien und Italien wurde der Neuwagenkauf mit einer vergleichbaren Prämie gefördert [ABD11b]. Allerdings ist hier kein vergleichbar starker Einfluss auf die europäischen Neuzulassungen erkennbar. In 2010 betrug das europäische Neuzulassungsvolumen nur noch 13,3 Mio. Einheiten, wovon 2,9 Mio. auf den volumenstärksten Markt Deutschland entfielen, was einem Anteil von 23 % entspricht. Hinter Deutschland folgen Frankreich mit 2,2 Mio., Großbritannien mit 2,0 Mio., Italien mit 2,0 Mio. Einheiten und Spanien mit 1,0 Mio. Fahrzeugen. Weniger als eine Million Fahrzeuge wurden in Belgien, den Niederlanden und Österreich neu zugelassen [ICC11d].

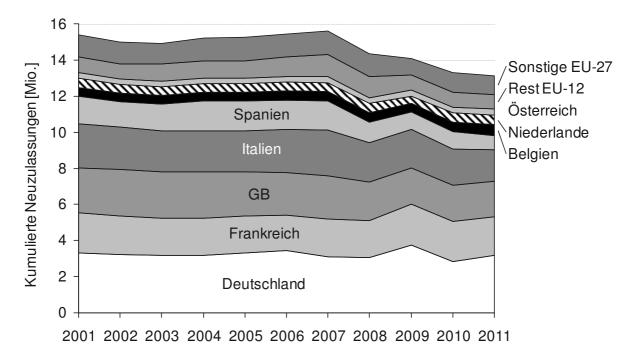


Abb. 3-14: Entwicklung der Neuzulassungen in Europa (EU27) 2001 bis 2011 [ICC11d]

Im Jahr 2011 hat sich der deutsche Fahrzeugmarkt mit einem Wachstum von 9 % auf 3,2 Mio. Einheiten nahezu auf Vorkrisenniveau erholt. In den restlichen Mitgliedsstaaten Europas sank dagegen die Nachfrage weiter, so dass sich für die EU27-Staaten in 2011 insgesamt 13,1 Mio. Neuzulassungen ergaben [ABD11c].

Vor 2007 galt der europäische Markt mit ca. 15 Mio. Neuzulassungen als gesättigt. Im Rahmen dieser Studie wird als Annahme definiert, dass der europäische Fahrzeugmarkt sich bis 2020 erholt und das Vorkrisenniveau von ca. 15 Mio. Einheiten wieder erreicht.

3.3.2 Entwicklung der Fahrzeugsegmente

Der CO₂-Ausstoß einer Fahrzeugflotte wird neben den genutzten Technologien vor allem durch die Zusammensetzung nach Fahrzeugsegmenten beeinflusst. Die Verteilung der Segmente wirkt sich über den Zusammenhang des Kraftstoffverbrauchs mit der Größe, dem Gewicht und der Ausstattung der Fahrzeuge auf die Emissionen aus. Abb. 3-15 zeigt eine Übersicht über gebräuchliche Klassifikationen der Fahrzeugsegmente in der EU und Deutschland. Obwohl es Abweichungen bei den wörtlichen Bezeichnungen gibt, lässt sich die Unterteilung der EU-Kommission direkt auf die Einteilung des KBA übertragen. Im weiteren Verlauf werden die Bezeichnungen der EU-Kommission verwendet.

Zur Reduzierung der Komplexität der in Kapitel 4 folgenden Technologie-Analyse sowie der Flottenberechnung für 2020 werden die Fahrzeugklassen hier in drei konsolidierten Kategorien zusammengefasst, in denen auf Grund der verbauten Technologien eine ähnliche technologische Entwicklung bzw. ein ähnliches Reduzierungspotenzial für CO₂-Emissionen erwartet wird.

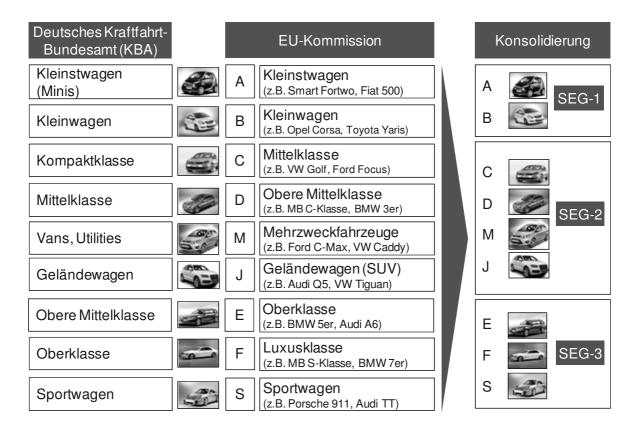


Abb. 3-15: Klassifikation und Konsolidierung der Fahrzeugsegmente

Das erste konsolidierte Segment (SEG-1) besteht aus Kleinst- und Kleinwagen. Im zweiten Segment (SEG-2) werden Mittelklasse, obere Mittelklasse, Mehrzweckfahrzeuge und Geländewagen zusammengefasst. Das dritte Segment (SEG-3) enthält Fahrzeuge der Oberklasse, Luxusklasse sowie Sportwagen. Es ist zu beachten, dass mehrere uneinheitliche Definitionen der Segmente und keine speziellen Vorgaben zu ihrer Einteilung existieren. Unter Umständen kann es daher zu geringen Abweichungen von segmentspezifischen Daten aus unterschiedlichen Quellen kommen [KBA12][EUR99].

Zur Identifizierung von Trends hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der Fahrzeugsegmente wird zunächst die bisherige Entwicklung untersucht. Für Deutschland zeigt Abb. 3-16 die Entwicklung der Marktzusammensetzung zwischen 2002 und 2010.

Anhand der Grafik erkennt man im SEG-1, also bei Kleinstwagen und Kleinwagen, ab 2005 einen Wachstumstrend. Auch bei Vernachlässigung des Einflusses der Abwrackprämie in 2009 bleibt dieser positive Trend für kleine Fahrzeuge erhalten. Im SEG-2 zeigt sich für die Mittelklasse ein konstanter Trend. Bei Mehrzweckfahrzeugen und vor allem bei Geländewagen ist ein Anstieg der Marktanteile zu beobachten. Dagegen verliert die obere Mittelklasse deutliche an Anteilen. Für das konsolidierte SEG-2 wird somit insgesamt ein konstanter Trend für die Zukunft abgeleitet. Im SEG-3 ist ein leicht negativer Trend ablesbar. Zwar bleibt der Anteil von Fahrzeugen der Luxusklasse ungefähr konstant, jedoch verlieren Sportwagen und besonders die Oberklasse Anteile am deutschen Fahrzeugmarkt.

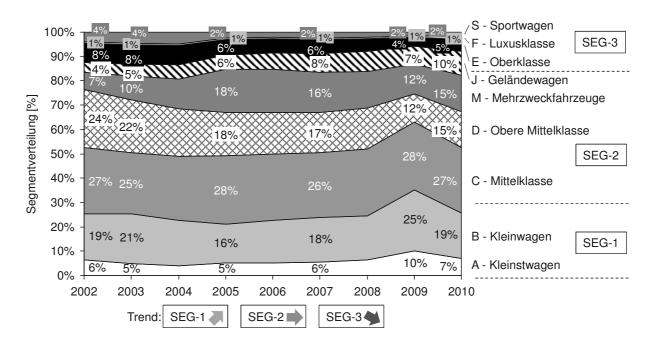


Abb. 3-16: Entwicklung der Marktzusammensetzung in Deutschland 2002 bis 2010 [Datenbasis: [KBA11]]

Auf der europäischen Ebene lässt sich eine leicht abweichende Entwicklung der Fahrzeugsegmente beobachten, siehe Abb. 3-17. Für das Jahr 2010 liegen jeweils Daten der ICCT und der EEA vor, die sich insbesondere aufgrund einer unterschiedlichen Zuordnung von

Mehrzweckfahrzeugen unterscheiden. Für eine Analyse der Trends wurde auf die einheitlich bewerteten Daten des ICCT zurückgegriffen.

Im SEG-1 findet für Kleinst- und Kleinwagen im Betrachtungszeitraum ein Wachstum statt. Dagegen verliert das SEG-2 insgesamt leicht an Marktanteilen. Durch ein Wachstum bei Geländewagen wird dieser rückläufige Trend abgeschwächt. Das SEG-3, bestehend aus Oberklasse, Luxusklasse und Sportwagen, weist unter leichten Schwankungen eine konstante Entwicklung auf.

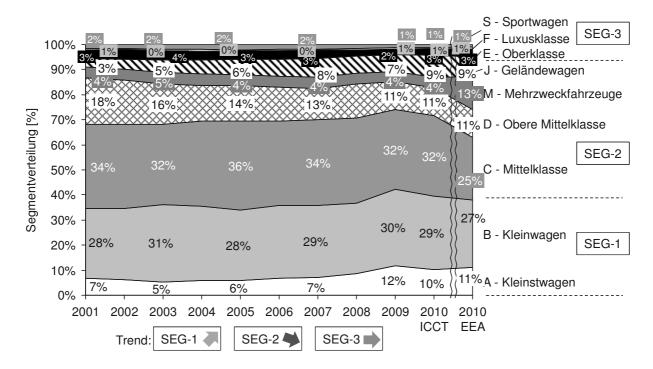


Abb. 3-17: Entwicklung der Fahrzeugsegmente in Europa (EU27) 2001 bis 2010 [Datenbasis: [EEA10][ICC11d]]

Im direkten Vergleich der Märkte Deutschland und Europa und deren Zusammensetzung der Fahrzeugsegmente werden die Unterschiede bei der Segmentierung sichtbar. Das SEG-2 ist sowohl in Deutschland mit 66 % als auch in Europa mit 58 % das volumenstärkste Segment. Darauf folgt das SEG-1 mit 26 % in Deutschland und mit 38 % in Europa. Das SEG-3 nimmt in Deutschland 8 % und in Europa 4 % ein.

Zusammenfassend zeichnet sich der europäische Markt gegenüber Deutschland vor allem durch ein höheres Volumen an kleinen Fahrzeugen der Kleinwagen- und Kleinstwagenklasse aus, wohingegen der Anteil von Premium-Fahrzeugen aus dem SEG-3 in Deutschland doppelt so groß ist [KBA11][EEA11].

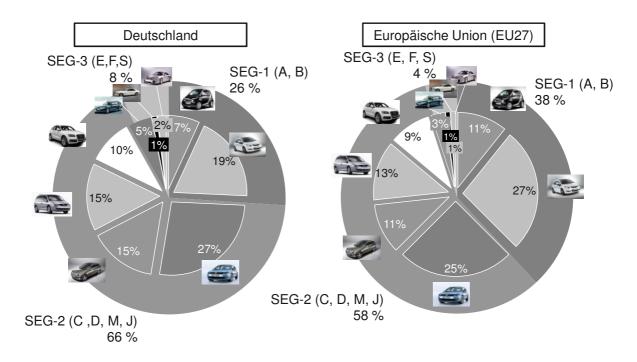


Abb. 3-18: Segmentverteilung der Neuzulassungen in Deutschland und Europa (EU27) in 2010 [Datenbasis: [KBA11][EEA11]]

Für die spätere Abschätzung eines Flottenwertes für die europäischen Neuzulassungen in 2020 wird für diesen Zeithorizont eine Annahme für die Marktzusammensetzung getroffen. Dieses Szenario für die Marktanteile der konsolidierten Segmente basiert auf der Analyse der bisherigen Entwicklung und den identifizierten Trends, siehe Abb. 3-19.

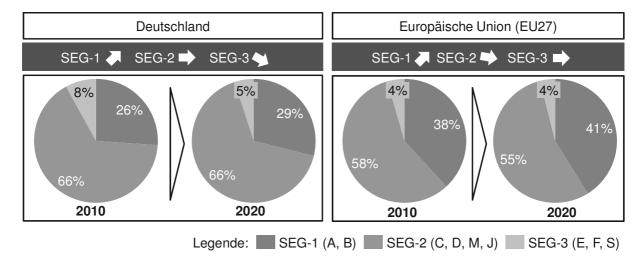


Abb. 3-19: Szenario der Fahrzeugsegment-Anteile für die Neuzulassungen in Deutschland und Europa (EU27) in 2020

Besonders prägnant, sowohl für Deutschland als auch Europa, ist ein Trend hin zu größeren Anteilen des SEG-1. Während dafür in Deutschland das SEG-3 Anteile verliert, muss in Europa das SEG-2 Anteile einbüßen. Bestätigt wird der Trend zu kleineren Fahrzeugen auch

durch mehrere Studienergebnisse, welche bis 2020 einen Durchbruch des Segments der Kleinstwagen in Europa vorhersagen, z.B. [ABD11a]. In einem Bericht des European Commission's Research Centre (JRC) werden die identifizierten Trends für Europa bestätigt, indem eine Zunahme der günstigeren Kleinwagensegmente zu Lasten des mittleren Segments prognostiziert wird [JRC10].

3.3.3 Entwicklung der Antriebskonzepte

Da in Kapitel 4 die Potenziale zur CO₂-Reduzierung aufgrund von grundlegenden technischen Unterschieden für Benzin- und Dieselmotoren getrennt ermittelt werden, wird neben der Segmentverteilung auch die zukünftige Zusammensetzung hinsichtlich der verwendeten Antriebskonzepte bzw. Kraftstoffarten benötigt.

Abb. 3-20 zeigt die Entwicklung der Kraftstoffarten in Deutschland und Europa im Vergleich. Seit 2001 ist in Deutschland und Europa ein Anstieg im Dieselanteil zu beobachten. Der Anteil dieselbetriebener Fahrzeuge wuchs über diesen Zeitraum in Deutschland um 7 % und in Europa um 5 %. Dieses Wachstum findet über alle Segmente hinweg statt, siehe dazu Abb. 13-6 zur Entwicklung des Dieselanteils pro Fahrzeugsegment im Anhang. Auffallend ist vor allem in Deutschland der starke Einbruch des Dieselanteils im Jahr 2009. Als Ursache kommt auch hier die Abwrackprämie in Frage, da im Kleinst- und Kleinwagensegment, die vordergründig von der Abwrackprämie profitierten, der kostengünstige Ottomotor vorherrscht.

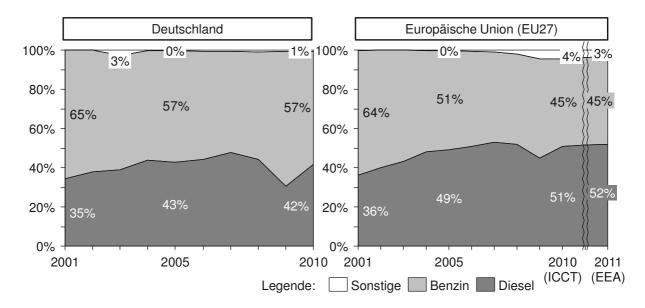


Abb. 3-20: Entwicklung der Kraftstoffarten bei den Neuzulassungen in Deutschland und Europa (EU27) 2001 bis 2010 [Datenbasis: [KBA11][EEA11][ICC11d]]

Der Anteil sonstiger Kraftstoffe, die vor allem Flüssiggas (LPG) und Erdgas (CNG) repräsentieren, weist lediglich in Europa ein nennenswertes Wachstum auf und erreichte 2010 in Europa 3 % und in Deutschland 1 %. Der Anteil von reinen Elektrofahrzeugen war 2010 sowohl in Deutschland mit knapp 0,02 % als auch in Europa mit ca. 0,01 % verschwindend gering.

Nur leicht höher war der Anteil von Hybridfahrzeugen an den Neuzulassungen mit 0,37 % in Deutschland und 0,6 % in Europa [KBA11][ICC11d].

Die Verteilung der Kraftstoffarten über die Fahrzeugsegmente veranschaulicht Abb. 3-21. Generell geht mit steigender Fahrzeuggröße bzw. steigendem Segmentniveau ein höherer Anteil dieselbetriebener Pkw einher. Eine Ausnahme bildet das Sportwagensegment mit einem Dieselanteil von 13 % in Deutschland bzw. 11 % in Europa.

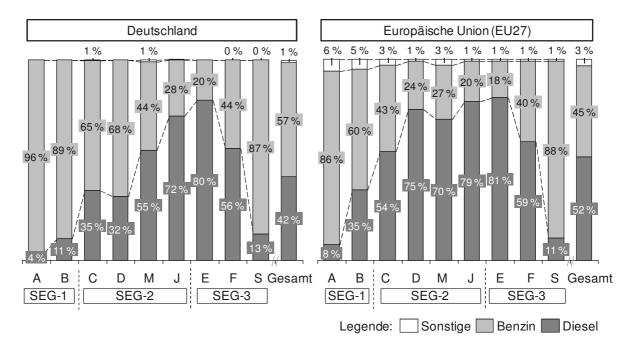


Abb. 3-21: Verteilung der Dieselanteile nach Segmenten bei den Neuzulassungen in Deutschland und Europa (EU27) in 2010 [Datenbasis: [KBA11][EEA11]]

Im direkten Vergleich der beiden Märkte zeichnet sich Europa vor allem in den Segmenten B, C, D und M durch einen signifikant höheren Dieselanteil aus. So kommt Deutschland 2010 insgesamt auf einen Dieselanteil von 42 %, während die EU einen Anteil von 52 % erreicht.

In die Annahmen für die Kraftstoff- bzw. Antriebskonzeptaufteilung in 2020, siehe Abb. 3-22, fließen neben den zuvor identifizierten Trends Prognosen veröffentlichter Studien ein. Für Deutschland wird ein steigender Anteil an Dieselfahrzeugen zu Lasten des Benzinanteils prognostiziert [SHE09]. Außerdem wird für das Jahr 2020 ein Anstieg der Elektromobilität vorhergesagt. Für Deutschland wird in 2020 die Zahl von Fahrzeugen mit Elektroantrieb, bestehend aus rein batteriebetriebenen Fahrzeugen, sowie Plug-in-Hybriden und Elektrofahrzeugen mit sogenannten Range-Extendern, in einem Szenario ohne Förderungsmaßnahmen auf 160.000 Neuzulassungen seitens der Nationalen Plattform Elektromobilität abgeschätzt. Dies entspricht bei Annahme von 3,3 Mio. Neuzulassungen in Deutschland in 2020 einem Anteil von leicht unter 5 % an den gesamten Neuzulassungen [NPE11]. Im Rahmen dieser Studie wird dieser Ansatz im Hinblick auf die Elektromobilität verwandt, da er im Hinblick auf die CO₂-Flottenemissionen eine Abschätzung zur sicheren Seite darstellt und

derzeit von der Bundesregierung keine Absicht zur Einführung einer Subventionierung von Elektrofahrzeugen erkennbar ist.

In Europa gibt es neben Staaten, die eine Förderung ablehnen, jedoch auch Mitgliedsstaaten mit finanzieller Förderung für den Kauf von Elektrofahrzeugen. Die Einschätzungen der NPE hinsichtlich der Entwicklung der Elektromobilität werden daher übertragen, indem ein Ansatz gewählt wird, welcher zwischen den Szenarien mit Förderung und ohne Förderung von Elektromobilität liegt. Dies führt mit 6 % zu einem höheren geschätzten Anteil an Elektrofahrzeugen in Europa im Vergleich zu Deutschland.

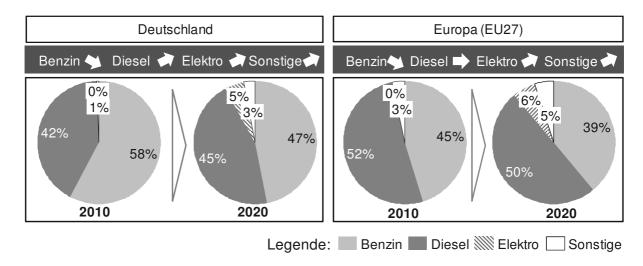


Abb. 3-22: Szenario der Kraftstoffanteile für die Neuzulassungen in Deutschland und Europa (EU27) in 2020

3.4 Analyse der CO₂-Segment- und Flottenemissionen in Europa

In diesem Kapitel wird die europäische Fahrzeugflotte im Hinblick auf ihren CO₂-Austoß untersucht. Dabei wird eine Analyse der einzelnen Mitgliedsstaaten, der Fahrzeughersteller sowie der Fahrzeugsegmente vorgenommen.

Der durchschnittliche CO₂-Ausstoß der gesamten europäischen Fahrzeugflotte betrug 2010 140,5 g CO₂/km. Für die einzelnen Mitgliedsstaaten ergab sich die in Abb. 3-23 dargestellte Verteilung [EEA11]. Deutschland weist im europäischen Vergleich einen höheren Flottendurchschnitt auf. So betrugen die CO₂-Emissionen für die deutsche Flotte im Durchschnitt 151,2 g CO₂/km, für Großbritannien 144,1 g CO₂/km, für Italien 132,8 g CO₂/km und für Frankreich 130,5 g CO₂/km. Wichtig ist hierbei die Betrachtung des hohen durchschnittlichen Gewichtes der deutschen Neuwagenflotten im Vergleich zu den anderen großen Mitgliedsstaaten.

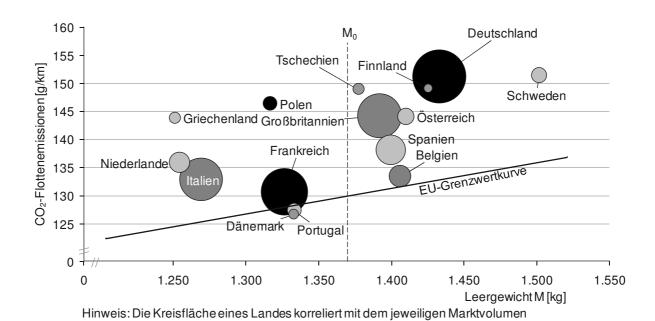


Abb. 3-23: CO₂-Ausstoß der EU-Neuzulassungen nach Mitgliedsstaaten über dem Leergewicht 2010 [Datenbasis: [EEA11]]

Entscheidend im Hinblick auf die EU-Gesetzgebung sind jedoch die Flottendurchschnitte der einzelnen Fahrzeughersteller, siehe Abb. 3-24.

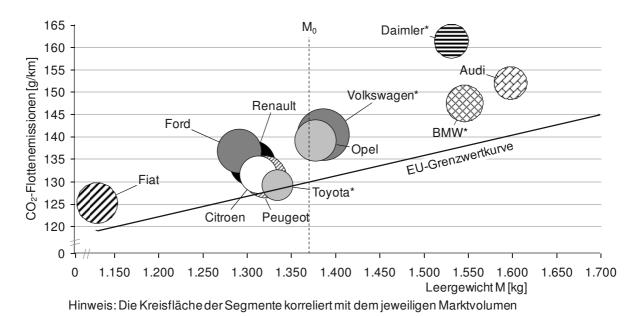


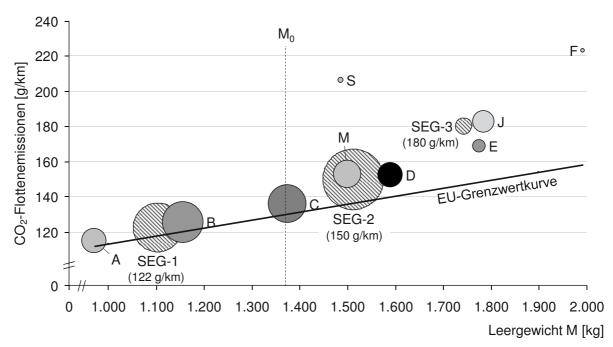
Abb. 3-24: CO₂-Emissionen der EU-Neuzulassungen nach Fahrzeughersteller über dem Leergewicht 2010 [Datenbasis: [EEA11]]

* Volkswagen = VW; BMW = BMW+MINI; Daimler = Mercedes+Smart; Toyota = Toyota+Lexus

Diese müssen bei Verfehlung der Vorgaben Strafzahlungen in Abhängigkeit der Überschreitung zahlen. Besonders nah an seinem individuellen Grenzwert von 128 g CO₂/km lag in

2010 der Hersteller Toyota mit einem CO_2 -Flottenausstoß von 129 g CO_2 /km. Der deutsche Volumenhersteller Volkswagen kam mit seinem CO_2 -Flottendurchschnitt von 140 g CO_2 /km auf einen Grenzwertabstand von 10 g CO_2 /km. Unter den deutschen Premium-Herstellern ist besonders die BMW Group nah an ihrem CO_2 -Ziel mit einem Abstand von 9 g CO_2 /km. Im Gegensatz dazu ist der Hersteller Daimler mit einem CO_2 -Flottendurchschnitt von 164 g CO_2 /km ca. 24 g CO_2 /km entfernt von seinem individuellen Grenzwert, siehe dazu Abb. 13-1 bis Abb. 13-3 im Anhang für die historische Entwicklung der CO_2 -Flottenemissionen nach Segmenten, Herstellern und Ländern.

Abb. 3-25 zeigt den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß der einzelnen Fahrzeugsegmente sowie der konsolidierten Segmente in 2010, berechnet auf Basis der EEA-Daten. Im Vergleich weist besonders das SEG-3 mit 180 g CO₂/km einen hohen Abstand zur CO₂-Grenzwert-kurve der EU auf, welche den gewichtsspezifischen Grenzwert beschreibt. Der durchschnittliche CO₂-Ausstoß für das SEG-1 betrug dagegen 122 g CO₂/km und für das SEG-2 150 g CO₂/km.



Hinweis: Die Kreisfläche eines Segments korreliert mit dem jeweiligen Marktvolumen

Abb. 3-25: CO₂-Austoß der EU-Neuzulassungen nach Segmenten über dem Leergewicht 2010 [Datenbasis: [EEA11]]

Auf der Detailebene liegen besonders Kleinst- und Kleinwagen sowie Mittelklassefahrzeuge nahe an ihren spezifischen Grenzwerten. Einen großen Abstand weisen dagegen Luxusfahrzeuge und Sportwagen auf. Es wird deutlich, dass zwischen den Segmenten im Hinblick auf die erforderlichen CO₂-Reduzierungen große Unterschiede bestehen, um die gewichtsspezifischen Grenzwerte zu erreichen. Das bedeutet, dass vor allem Hersteller großer und sportlicher Fahrzeuge im Durchschnitt höhere Anstrengungen zur Einhaltung der Vorgaben unter-

nehmen müssen. Anhand des dargestellten Marktvolumens sowie des durchschnittlichen CO_2 -Ausstoßes ergeben sich außerdem die Beiträge der Segmente zum gesamten Flottenausstoß. Das SEG-1 trägt mit 33 % zum CO_2 -Flottenausstoß bei, das SEG-2 mit 62 % und das SEG-3 mit 5 %.

3.5 Entwicklungs- und Produktionszyklen auf Fahrzeug- und Technologieebene

In diesem Kapitel werden derzeitige Entwicklungs- und Produktionszyklen der Automobilindustrie untersucht, um abhängig vom technologischen Entwicklungsstand auf die Einführungszeiträume neuer Technologien ins Kraftfahrzeug schließen zu können. Hierzu wird der Prozess der Fahrzeugentwicklung bis auf die Systemebene mit einem Fokus auf den Antriebsstrang analysiert.

Zu Beginn soll der Lebenszyklus einer Technologie betrachtet werden. Es existieren zahlreiche Modelle zur Beschreibung des typischen Verlaufes des technologischen Fortschritts einer Technologie über die Zeit. Das Modell zur Entwicklung eines Technologielebenszyklus, entworfen von Arthur D. Little, unterscheidet vier verschiedene Phasen: Entstehung, Wachstum, Reife und Alter, siehe Abb. 3-26 [MOC10].

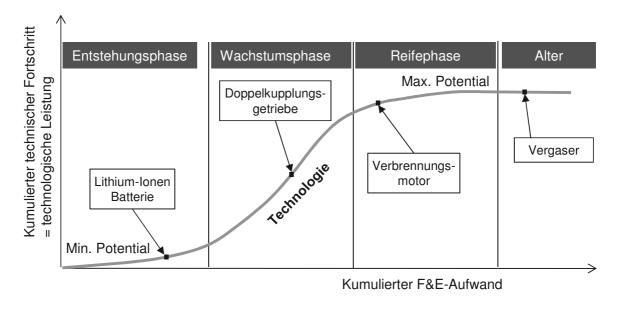


Abb. 3-26: Technologie S-Kurve [In Anlehnung an [MOC10]]

Während der Entstehungsphase hat eine neue Technologie einen geringen Bekanntheitsgrad, geringe verfügbare Forschungsgelder und noch grundlegende technische Probleme, so dass die Rate des technischen Fortschritts während dieser Phase gering ist. Ein Beispiel für eine Technologie in der Entstehungsphase ist die Lithium-Ionen Batterie für mobile Anwendungen, die bisher nicht viel mehr als ihr minimales Potenzial darstellen kann. Mit Hilfe kontinuierlicher Forschungsanstrengungen kann die technologische Hemmschwelle zur Wachstumsphase überwunden und ein Prozess starken Wachstums in Gang gesetzt werden. Für diese Phase stellt das Doppelkupplungsgetriebe ein Beispiel für eine stark wachsende Technologie dar.

Wird dann die Reifephase erreicht, so verlangsamt sich die Rate des technischen Fortschritts bis sie schließlich abnimmt. Fortschritte sind zu diesem Zeitpunkt nur noch unter einem großen finanziellen und zeitlichen Aufwand zu erzielen. Derzeit befindet sich der Verbrennungsmotor in der Phase, in der sein maximales Potenzial erreicht werden wird.

Beim Erreichen des Endes der Reifephase einer Technologie wird es erforderlich, weitere Fortschritte durch eingreifende Veränderungen an der technologischen Plattform vorzunehmen. Die alte Technologie wird von einer neuen verdrängt, so dass ein neuer Produktlebenszyklus beginnt. Während das Potenzial einer Technologie zu Beginn ihres Lebenszyklus nur geringfügig ausgeschöpft werden kann, wird dagegen in der Reifephase ihr maximales Potenzial verfügbar [MOC10].

Auf einer übergeordneten Ebene können die Aktivitäten im Rahmen der Fahrzeugentwicklung bzw. der Entwicklung entsprechender Technologien in drei Phasen auf der zeitlichen Achse bis zum Produktionsanlauf (SOP) unterteilt werden, Abb. 3-27.

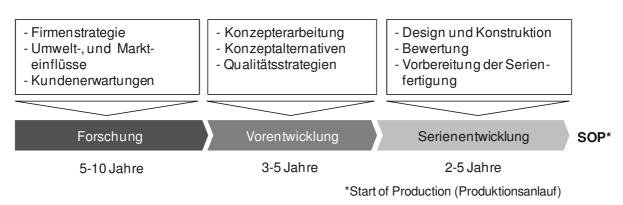


Abb. 3-27: Phasen in der Fahrzeugentwicklung [In Anlehnung an [SCH09]]

In der Forschung werden im Rahmen der Firmenstrategie Umwelt und Markteinflüsse sowie Kundenerwartungen ermittelt, um in Frage kommende Technologien zu identifizieren. In der Vorentwicklung werden auf Basis der Forschungsergebnisse Konzeptalternativen ausgestaltet und Qualitätsstrategien erarbeitet. Schließlich folgt in der Serienentwicklung die Umsetzung der Konzepte und die Entwicklung der Technologie zur Produktionsreife, indem das Design und die Konstruktion finalisiert und bewertet werden [SCH09].

Der Prozess in der Vor- und Serienentwicklung von gesamten Fahrzeugen oder Komponenten des Antriebsstranges beinhaltet eine Vielzahl von Aktivitäten, die untereinander abhängig sind. Sie reichen von der Identifizierung von Kundenbedürfnissen, Marketing-Aktivitäten und, über verschiedene Ingenieurstätigkeiten bis hin zur Produktionsplanung und einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess. Auch wenn jeder Fahrzeughersteller einen eigenen detaillierten Produktentwicklungsprozess besitzt, lassen sich dennoch wesentliche Merkmale und Meilensteine identifizieren, die vergleichbar sind, siehe Abb. 3-28 [TNO11].

Abb. 3-28: Verallgemeinerter Technologie- und Fahrzeugentwicklungsprozess und resultierende Einführungszeiträume [In Anlehnung an [TNO11]]

Am Anfang eines Fahrzeugentwicklungsprozesses steht die Entwicklung einzelner Technologien, welche im darauf folgenden Fahrzeugentwicklungsprozess ins Fahrzeug integriert werden. Aus dem dargestellten Prozessplan ergeben sich damit mögliche Zeiträume für die Einführung von neuen Technologien oder Änderungsumfängen, die beim weiteren Vorgehen dieser Studie berücksichtigt werden müssen. Die Entwicklung und Fahrzeugimplementierung einer neuen Technologie sowie die Entwicklung einer neuen Fahrzeugplattform dauern ca. fünf Jahre. Die Entwicklung eines Fahrzeugderivates bzw. die Implementierung einer neuen Technologie, deren Eigenschaften bereits demonstriert werden konnten, dauert ca. zwei bis drei Jahre. Dagegen erfordert die Integration einer existierenden und vollständig entwickelten Technologie in eine neue Fahrzeuganwendung lediglich zwischen ca. 18 Monaten und zwei Jahren. Überträgt man die Dauer einer Technologie-Neuentwicklung auf die Systemebene des Antriebsstrangs, so dauert die Entwicklung einer neuen Motorenplattform also ca. drei Jahre [AWO12a][TNO11].

Die aufgezeigten Entwicklungszeiten für neue Technologien sind als durchschnittliche Anhaltswerte zu verstehen, da der Umfang der Änderungen am Fahrzeug oder Antriebsstrang einen großen Einfluss auf die Zeit nimmt, die es braucht, um ein Fahrzeug bzw. eine Technologie auf den Markt zu bringen. Kleine Änderungen, welche schneller zur Serienreife gebracht werden können, sind z.B. eine Änderung der Getriebeübersetzung oder die Rekalibrierung eines existierenden Motors für eine neue Fahrzeuganwendung. Beispiele für große

Änderungsumfänge wären dagegen die Weiterentwicklung eines existierenden Motors hinsichtlich Aufladung, Direkteinspritzung oder auch die Hybridisierung eines Antriebstrangs [TNO11].

Betrachtet man die historischen Produktzyklen bis hin zu aktuellen Fahrzeugmodellen, so lässt sich ein Trend hin zu einer Verkürzung von Produktzyklen in der Automobilindustrie erkennen. Abb. 3-29 veranschaulicht dies mit Beispielen für die einzelnen Segmentkategorien.

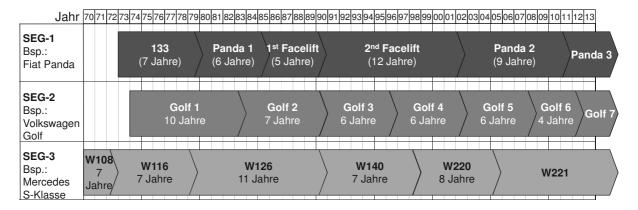


Abb. 3-29: Beispiele für die Verkürzung von Produktionszyklen nach Fahrzeugsegmenten [Datenbasis: Herstellerangaben]

Während z.B. der Golf I für 10 Jahre produziert und verkauft wurde, folgte auf den Golf V bereits nach 6 Jahren der Golf VI. Allerdings basiert der Golf VI nahezu auf derselben Plattform, so dass es sich in diesem Fall nur um ein Facelift mit großem Umfang handelt. Daher wird der Golf VI bereits 2012 nach 4 Jahren durch den Golf VII abgelöst werden [VOL12a][AUT12]. Fahrzeuge des Mittelklasse-Segmentes, z.B. VW Golf, haben im Allgemeinen kürzere Zyklen zwischen Plattformwechseln als andere Segmente, da sie das größte Marktvolumen in Europa besitzen, siehe Kap. 3.3.1. Dadurch gibt es in dieser Fahrzeugklasse einen besonders starken Wettbewerb [TNO11].

Die Fahrzeughersteller versuchen, die Entwicklungszeiten stetig weiter zu reduzieren. Die Ursachen liegen vor allem in der zunehmenden Modell- und Variantenvielfalt aufgrund von sich wandelnden Kundenanforderungen sowie einem steigenden Wettbewerb aufgrund einer zunehmenden Konzentration der Wettbewerber [WAL11]. In der Folge werden von den Herstellern in immer kürzeren Abständen neue Modelle und Varianten auf den Markt gebracht. Ein wichtiges Hilfsmittel bei der Verkürzung von Entwicklungszeiten besteht in der Ergänzung und teilweisen Substitution von Versuchen durch virtuelle Methoden. Durch den Einsatz von virtuellen Prototypen können die Einführungszeiten von Technologien verkürzt werden, wobei ein zu starker Verzicht auf den konventionellen Prototypenbau die Qualität eines Produktes gefährden kann. Darüber hinaus beeinflussen Kooperationen mit Zulieferern oder anderen Herstellern, Plattform-Strategien bzw. das Teilen von Fahrzeugplattformen die Einführungszeit. Indem fertige Technologien bezogen oder gemeinsam entwickelt werden, kann

so die Implementierung von einem fünf Jahresprogramm auf 18 Monate bis drei Jahre reduziert werden [TNO11].

Fahrzeughersteller planen die Entwicklung von Fahrzeugen und Antriebssträngen anhand von Zyklusplänen, welche die zeitliche Abfolge neuer Modelle, Varianten, Facelifts oder Plattformwechseln bzw. die Entwicklung neuer Motorenplattformen und Varianten zeigen. Eine Fahrzeugplattform besteht im Allgemeinen aus Karosseriemodulen, Fahrwerkssystemen und Motor- und Antriebssystemen. Kommt es zu einem Wechsel der Plattform so wird die Architektur des Fahrzeugs als Ganzes geändert, so dass auch die Anlagen und Werkzeuge in der Produktion angepasst bzw. neu beschafft werden müssen. Dagegen werden bei einem Facelift kleinere Änderungen vorgenommen, ohne die Fahrzeugplattform zu verändern [TNO11]. Abb. 3-28 stellt beispielhaft einen vereinfachten Modell- und Motoren-Zyklusplan des VW Golf dar.

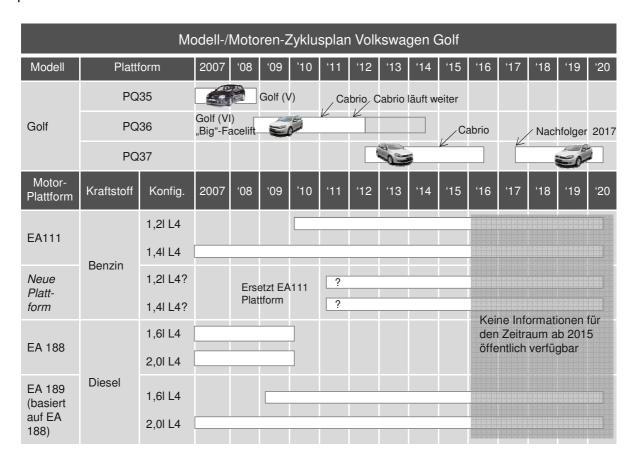


Abb. 3-30: Zyklusplan am Beispiel des Volkswagen Golf [In Anlehnung an [TNO11]]

In der Abbildung ist erkennbar, dass in der Zeit des CO₂-Phase-in zwischen 2012 und 2015 die Einführung eines neuen Modells mit Plattformwechsel sowie die Einführung neuer Motoren vollzogen werden. Betrachtet man die verschiedenen Fahrzeug-Hersteller und ihre Zykluspläne im Durchschnitt, so finden Plattformwechsel in der Regel alle 6-8 Jahre statt, wobei dazwischen in vielen Fällen alle 3 bis 4 Jahre Facelifts durchgeführt werden. In dem Beispiel von Volkswagen wird zwischen 2015 und 2020 ein weiterer Modellwechsel durchgeführt, so

dass hier eine Anpassung an die noch zu entscheidende europäische CO₂-Gesetzgebung für 2020 möglich erscheint.

Außerdem wird in Abb. 3-28 deutlich, dass Plattformwechsel, Facelifts oder Einführung von Motorvarianten versetzt stattfinden, um die Komplexität und Anzahl möglicher Fehlerquellen einzugrenzen. Die Motorenplattformen weisen auch herstellerübergreifend in der Regel einen typischen Lebenszyklus von 10 bis 15 Jahren auf und erfahren währenddessen regelmäßig kleinere und alle 3 bis 7 Jahre größere technische Überarbeitungen. Betrachtet man den Durchschnitt verschiedener Hersteller, so ist eine relativ gute Anpassung der Motoreneinführungen an das In-Kraft-Treten der Abgasnormen Euro 4, Euro 5 und Euro 6 zu erkennen, die neue Anforderungen im Hinblick auf die Reduzierung von Schadstoffemissionen vorschreiben. Diese Normen wurden langfristig im Voraus definiert, so dass die Zykluspläne entsprechend angepasst werden konnten [TNO11].

Die Zykluspläne sehen eine Zeitspanne von ca. 10 Jahren vor, wobei nur die ersten 5 Jahre detailliert hinsichtlich geplanter Ressourcen und Investitionen konkretisiert werden. Die zeitliche Ausgestaltung dieser Pläne ist vom verfügbaren Budget, den Ressourcen und den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig, wobei eine beschleunigte Entwicklung immer eine Erhöhung der benötigten Ressourcen und des Budgets zur Folge hat. Hinsichtlich der Flexibilität auf Änderungen in den gesetzlichen Rahmenbedingungen benötigt ein Hersteller also nach Möglichkeit einen 6-Jahres-Horizont, da für den Zeitraum danach noch keine konkretisierten Entwicklungsprozesse in Gang gesetzt wurden. Die europäische CO₂-Gesetzgebung für 2020 sollte folglich möglichst zeitnah, spätestens jedoch bis 2014 finalisiert werden, um den Fahrzeugherstellern eine Anpassung ihre Zykluspläne zu ermöglichen und somit Planungssicherheit zu gewährleisten [TNO11].

3.6 Zwischenfazit

Die Automobilindustrie muss sich zukünftig auf den Kernmärkten in Europa, USA und Japan auf verschärfende Regulierungen der CO₂-Emissionen bzw. des Kraftstoffverbrauchs einstellen. Die offiziellen Grenzwerte müssen dabei immer in Zusammenhang mit den entsprechenden Messzyklen betrachtet werden. Allerdings wird derzeit mit der Entwicklung des WLTP an einer Vereinheitlichung der Fahrzyklen gearbeitet. Für die Zukunft hat die Europäische Union das ehrgeizigste CO₂-Flottenziel und daraus abgeleitete CO₂-Vorgaben. Während Japan mit geringem Abstand folgt, sind die Flottenemissionsziele in den USA vergleichsweise wenig ambitioniert.

Die Betrachtung der Märkte in Deutschland und Europa ergab, dass die Neuzulassungen vor der Finanz- und Wirtschaftskrise relativ konstant ein Sättigungsniveau von 15 Mio. Einheiten erreichten. Im Rahmen dieser Studie wird erwartet, dass der europäische Fahrzeugmarkt sich bis 2020 erholt und das Vorkrisenniveau von 15 Mio. Einheiten wieder erreicht.

Bei der Untersuchung der Marktzusammensetzung wurde für Europa im Vergleich zu Deutschland ein höherer Anteil an kleinen Fahrzeugen festgestellt, wobei für die Zukunft in beiden Märkten ein Trend hin zu kleineren Fahrzeugen identifiziert wurde. Auch im Bereich

Bei der Untersuchung der europäischen Segmente im Hinblick auf CO₂-Emissionen wurde herausgestellt, dass gerade das Sportwagen- und Luxussegment, aber auch Geländefahrzeuge und Fahrzeuge der Oberklasse im Jahr 2010 noch weit entfernt von ihren massenbezogenen CO₂-Grenzwerten für 2012 lagen. Insgesamt betrug der CO₂-Durchschnitt der europäischen Neuwagenflotte 2010 140,5 g CO₂/km. Die Automobilhersteller mit einer Fahrzeugflotte vornehmlich in den Segmenten SEG-1 und SEG-2 sind den gesetzten Grenzwerten vergleichsweise nahe. Im Gegensatz dazu sind die Hersteller mit einem breiten Produktportfolio sowie Schwerpunkten in den Segmenten SEG-2 und SEG-3 weiter von ihren spezifischen Zielwerten entfernt.

Eine europäische Verordnung für 2020 sollte aufgrund des Planungshorizonts der Hersteller von fünf bis zehn Jahren möglichst zeitnah definiert werden. Die Produktionszyklen haben sich in den vergangenen Jahren deutlich verkürzt und sind von Budget, Ressourcen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig. Fahrzeug-Plattformwechsel finden alle sechs bis acht Jahre statt. Die Antriebsstrangzyklen betragen dagegen 10 bis 15 Jahren. Die Einführung von Fahrzeugmodellen und Motoren findet versetzt statt, um die Komplexität zu reduzieren und die Fehlermöglichkeiten zu minimieren. Auf Technologieebene ist die Zeitspanne zum Erreichen der Serienreife und dem Fahrzeugeinsatz stark abhängig vom aktuellen Entwicklungsstand und der Komplexität und variiert zwischen 18 Monaten und 5 Jahren.

4 Technologische und wirtschaftliche Potenzialanalyse (AP2)

Im zweiten Arbeitspunkt werden im Rahmen einer Metaanalyse die technischen Potenziale der einzelnen Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung und ihre Kosten untersucht. Die Ergebnisse wurden dabei detailliert für sechs Referenzfahrzeuge mit Otto- und Dieselmotor in den drei konsolidierten Fahrzeugsegmenten dargestellt und quantifiziert, vgl. Abb. 4-1.

Segment	Markt- anteil 2010	Anteil im SEG	Kraftstoff	Gewicht [kg]	Verbrauch [l/100km]	CO ₂ [g/km]	Hubraum [l]	Motor	DI	Getriebe	Leistung [kW]
SEG-1 (A,B)	36%	69 %	Benzin	1.067	5,4	127	1,2	4-Zylinder	-	Manuell, 5-Gang	60
	30 %	31 %	Diesel	1.194	4,1	111	1,4	4-Zylinder	х	Manuell, 5-Gang	60
SEG-2	1 5/%	33 %	Benzin	1.396	6,8	159	1,6	4-Zylinder	-1	Manuell, 6-Gang	90
(C,D,M,J)		67%	Diesel	1.573	5,4	145	2,0	4-Zylinder	х	Manuell, 6-Gang	90
SEG-3	4%	25 %	Benzin	1.635	9,1	213	2,8	6-Zylinder	Х	Automatik, 6-Gang	170
(E,F,S)		75 %	Diesel	1.795	6,1	164	3,0	6-Zylinder	Х	Automatik, 6-Gang	170

Abb. 4-1: Technische Spezifikationen der Referenzfahrzeuge [Basis: EEA11][ICC11d]

* Gas- und Elektrofahrzeuge werden durch weitere Annahmen abgebildet.

Die Maßnahmen mit Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch können in Maßnahmen zur Reduzierung des Fahrwiderstands und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung in der Energiewandlung unterschieden werden. Dabei lassen sich auf Fahrwiderstandsseite mit rollwiderstandsreduzierten Reifen, aerodynamischen Maßnahmen und Leichtbau Potenziale erschließen. Die Steigerung der Effizienz in der Energiewandlung lässt sich durch motorische Maßnahmen, Elektrifizierung des Antriebs sowie Optimierung des Getriebes erreichen. Gerade bei den motorischen Maßnahmen unterscheiden sich die technischen Rahmenbedingungen der Otto- und Diesel-Prozesse, so dass jeweils eine spezifische detaillierte Betrachtung durchgeführt wurde. Zusätzlich wurden unabhängig vom Motorenkonzept übergreifende Maßnahmen identifiziert, die sich insbesondere auf den thermodynamischen Wirkungsgrad beziehen.

Die Analyse der Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung zeigt, dass nicht alle technisch möglichen Maßnahmen im NEFZ-Zyklus Berücksichtigung finden. Daher eröffnet sich zukünftig ein beschränktes zusätzliches Potenzial in der Anmeldung von "Ökoinnovationen". Darüber hinaus werden die elektrifizierten Antriebe der batterieelektrischen Fahrzeuge und Plug-In Hybridfahrzeuge in den folgenden Arbeitspunkten im Rahmen einer Szenarioanalyse weiter betrachtet.

Die im **Anhang A:** "**Technologiebeschreibungen**" detailliert vorgestellten Technologien werden in den folgenden Darstellungen, vgl. Abb. 4-2 und Abb. 4-3, tabellarisch in einer aggregierten Übersicht zusammengefasst, wobei sich die Potenziale, Kosten und Gewichtsänderungen je Segment unterscheiden. Diese Ergebnisse der wirtschaftlichen und technischen Potenzialanalyse bilden die Grundlage für die folgenden Berechnungsschritte zur Ermittlung des Gesamtpotenzials zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bis 2020.

					Benzii	ntechnolo	aien			
			SEG-1			SEG-2	<u> </u>		SEG-3	
	Technologie	Einsparung	Kosten	Gewicht	Einsparung	Kosten	Gewicht	Einsparung	Kosten	Gewicht
	Direkteinspritzung, homogen	3,0%	150 €	0,1%	3,0%	150 €	0,1%	-	-	1
	Direkteinspritzung, Schichtladung	8,0%	500 €	0,2%	8,0%	600 €	0,2%	5,0%	600€	0,1%
	Downsizing (Stufe 1)	4,0%	150 €	-0,3%	5,0%	200 €	-0,3%	6,0%	250 €	-0,3%
	Downsizing (Stufe 2)	8,0%	400 €	-0,5%	9,0%	450 €	-0,5%	10,0%	500 €	-0,5%
_	Downsizing (Stufe 3)	15,0%	550 €	-0,8%	16,0%	600 €	-0,8%	17,0%	700 €	-0,8%
Motor	Gekühlte-/ Hochlast- AGR	-	-	-	4,0%	200 €	0,5%	4,0%	200 €	0,5%
	HCCI / CAI	10,0%	450 €	k.A.	11,0%	475 €	k.A.	12,0%	500€	k.A.
	Variable Verdichtung	7,0%	500 €	k.A.	7,0%	550 €	k.A.	7,0%	600€	k.A.
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,0%	100€	0,2%	3,0%	100 €	0,2%	3,0%	100 €	0,2%
	Ventilsteuerung - vollvariabel	8,0%	300 €	0,5%		320 €	0,5%	10,0%	360 €	0,5%
	Zylinderabschaltung	5,0%	100 €	0,0%	5,0%	110 €	0,0%	5,0%	120€	0,0%
Elektrifzierung	Micro-Hybrid	7,0%	350 €	0,5%		380 €	0,5%	7,0%	425 €	0,5%
ktrifzi	Mild-Hybrid	13,0%	1.400 €	3,0%	13,0%	1.500 €	3,0%	13,0%	1.500 €	3,0%
Ele	Full-Hybrid	25,0%	2.400 €	8,0%	25,0%	2.900 €	8,0%	25,0%	3.000 €	8,0%
	Getriebeoptimierung / Downspeeding	3,0%	30 €	0,0%	3,0%	30 €	0,0%	3,0%	30 €	0,0%
e e	Automatisiertes Schaltgetriebe	2,5%	250 €	1,0%	-	-	-	-	-	-
Getriebe	Stufenloses Getriebe (CVT)	4,0%	600€	2,0%	4,0%	600 €	2,0%	5,0%	0€	0,0%
	Doppelkupplungs- getriebe	5,0%	500 €	2,0%	5,0%	500 €	2,0%	9,0%	0€	0,0%
	7/8/9-Gang- Automatik	-	-	-	-	-	-	7,0%	100 €	0,0%
nen	Reibungs- reduzierung im Antriebsstrang	2,0%	50 €	0,0%	2,5%	60 €	0,0%	3,0%	80€	0,0%
3nahr	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,0%	130 €	0,0%	3,0%	150 €	0,0%	3,0%	170 €	0,0%
Mal	Thermomanagement	2,0%	150 €	0,0%	2,0%	150 €	0,0%	2,0%	150 €	0,0%
greifende Maßnahmen	Wärme- Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	2,0%	400 €	1,0%	2,0%	400 €	1,0%	2,0%	400 €	1,0%
Übergr	Wärme- Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	2,0%	800€	1,0%	2,0%	800€	1,0%	2,0%	800€	1,0%
	Rollwiderstands- reduzierte Reifen	2,0%	25 €	0,0%	2,0%	30 €	0,0%	2,0%	40 €	0,0%
	Aerodynamik- Optimierung	1,5%	60 €	0,0%	1,5%	65 €	0,0%	1,5%	70€	0,0%
tände	Aerodynamik-Design	2,0%	60 €	0,0%	2,0%	65 €	0,0%	2,0%	70€	0,0%
Fahrwiderstände	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	130 €	-2,0%	1,5%	160 €	-2,0%	1,5%	190€	-2,0%
Fahr	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	350 €	-7,0%	5,0%	400 €	-7,0%	5,0%	480 €	-7,0%
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	800€	-12,0%	9,0%	1.000 €	-12,0%	9,0%	1.200 €	-12,0%
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	120€	-1,0%	1,5%	150 €	-1,0%	1,5%	180€	-1,0%
	Entwicklungsstadium:	Serie verfügba	r bis 2014		nentwicklung gbar ab 2014 -	- 2018	Vorentwic verfügbar	klung ab 2018 - 20		orschung 2022

Abb. 4-2: Übersicht der Technologien zur CO₂-Reduzierung bei Benzinfahrzeugen [Aggregiert aus [TNO11][EPA10b][MOC10][RIC11][RIC12][FEV12c] und Weitere]

					Dieselte	echnolog	ien				
			SEG-1			SEG-2	ien		SEG-3		
	Technologie	Einsparung	Kosten	Gewicht	Einsparung	Kosten	Gewicht	Einsparung	Kosten	Gewicht	
	Downsizing (Stufe 2)	4,0%	200 €	-0,5%	4,0%	250 €	-0,5%		300 €	-0,5%	
	Downsizing (Stufe 3)	7,0%	400 €	-0,8%	7,0%	450 €	-0,8%		500 €	-0,8%	
	Verbrennungs-				-						
	steuerung	1,0%	100 €	0,0%	1,0%	120 €	0,0%	1,0%	150 €	0,0%	
ō	AGR - verbesserte										
Motor	Kühlung und	2,0%	160 €	0,0%	2,0%	180 €	0,0%	2,0%	200 €	0,0%	
	Strömung	4.00/	F00.6	1. 4	4.00/	FF0.6	1. 4	4.00/	000.6	1. 4	
	Variable Verdichtung	4,0% 3,0%	500 € 150 €	k.A. 0,0%	4,0%	550 €	k.A. 0,0%	4,0%	600 €	k.A. 0,0%	
	Zylinderabschaltung Ventilsteuerung -	3,0%	150 €		3,0%	160 €		3,0%	170 €		
L	vollvariabel	1,0%	280 €	0,5%	1,0%	280 €	0,5%	1,0%	280 €	0,5%	
Elektrifzierung	Micro-Hybrid	6,0%	375 €	0,5%	6,0%	375 €	0,5%	6,0%	375 €	0,5%	
ctrifzi	Mild-Hybrid	9,0%	1.400 €	3,0%	9,0%	1.500 €	3,0%	9,0%	1.500 €	3,0%	
Ele-	Full-Hybrid	22,0%	2.400 €	8,0%	22,0%	2.900 €	8,0%	22,0%	3.000 €	8,0%	
	Getriebeoptimierung / Downspeeding	2,0%	30 €	0,0%	2,0%	30 €	0,0%	2,0%	30 €	0,0%	
Ф	Automatisiertes Schaltgetriebe	2,5%	250 €	1,0%	-	-	-	-	-	-	
Getriebe	Stufenloses Getriebe (CVT)	3,0%	600 €	2,0%	3,0%	600 €	2,0%	4,0%	0€	0,0%	
Q	Doppelkupplungs- getriebe	4,0%	500 €	2,0%	4,0%	500 €	2,0%	8,0%	0€	0,0%	
	7/8/9-Gang- Automatik	-	-	-	-	-	-	6,0%	100 €	0,0%	
	Reibungs- reduzierung im Antriebsstrang	2,0%	50 €	0,0%	2,5%	60 €	0,0%	3,0%	80€	0,0%	
ahmei	Elektrifizierung von	3,0%	130 €	0,0%	3,0%	150 €	0,0%	3,0%	170 €	0,0%	
Maßn	Nebenaggregaten Thermomanagement	2,0%	150 €	0,0%	2,0%	150 €	0,0%	2,0%	150 €	0,0%	
de l	Wärmeenergie-										
Übergreifende Maßnahmen	Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	2,0%	400 €	1,0%	2,0%	400 €	1,0%	2,0%	400 €	1,0%	
Übe	Wärmeenergie- Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	2,0%	800€	1,0%	2,0%	800€	1,0%	2,0%	800€	1,0%	
	Rollwiderstands- reduzierte Reifen	2,0%	25 €	0,0%	2,0%	30 €	0,0%	2,0%	40 €	0,0%	
	Aerodynamik- Optimierung	1,5%	60 €	0,0%	1,5%	65 €	0,0%	1,5%	70€	0,0%	
nde	Aerodynamik-Design	2,5%	60 €	0,0%	2,5%	65 €	0,0%	2,5%	70€	0,0%	
erstä	Leichtbau - leicht	1,5%	140 €	-2,0%	1,5%	170 €	-2,0%		200€	-2,0%	
Fahrwiderstände	(Karosserie) Leichtbau - mittel	5,0%	350 €	-7,0%	5,0%	430 €	-7,0%		510€	-7,0%	
Fa	(Karosserie) Leichtbau - stark	9,0%	850 €	-12,0%		1.050 €	-12,0%		1.250 €	-12,0%	
	(Karosserie) Leichtbau - Komponenten	1,5%	120 €	-1,0%	1,5%	150 €	-1,0%	1,5%	180 €	-1,0%	
	Entwicklungsstadium:	Serie verfügbar	[bis 2014		entwicklung oar ab 2014 - 2		Vorentwic verfügbar	cklung ab 2018 - 20		orschung o 2022	

Abb. 4-3: Übersicht der Technologien zur CO₂-Reduzierung bei Dieselfahrzeugen [Aggregiert aus [TNO11][EPA10b][MOC10][RIC11][RIC12][FEV12c] und Weitere]

5 Entwicklungsszenarien und Darstellung der CO₂-Reduktionspotenziale (AP3)

Ziel dieses Kapitels ist die Ableitung von CO₂-Reduktionspotenziale für die europäische Neufahrzeugflotte bis 2020 auf Basis der vorangegangenen Technologie- und Umfeldanalyse. In einem ersten Schritt werden die zuvor identifizierten Technologien bewertet und anhand eines strukturierten Vorgehens in Technologiepakete zusammengefasst. Anhand dieser Pakete werden dann Entwicklungsszenarien entworfen und bewertet. Anschließend werden mit einer 100 % Marktpenetration der Technologiepakete die möglichen unteren Grenzen der CO₂-Flottenwerte sowie die resultierenden CO₂-Minderungskosten und Flottengewichte ermittelt, vgl. Abb. 5-1.

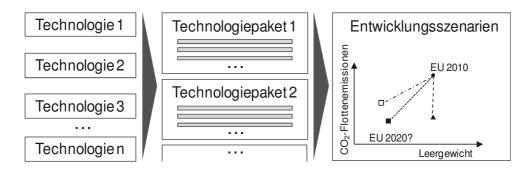


Abb. 5-1: Methodische Vorgehensweise zur Ermittlung der CO₂-Reduktionspotenziale

5.1 Zusammenstellung von Technologiepaketen

Im Folgenden wird die Zusammenstellung von Technologiepaketen beschrieben. Dabei wird das Vorgehen bei der Technologiebewertung erläutert und eine Abschätzung relevanter Wechselwirkungen zwischen Technologien aufgezeigt. Außerdem erfolgt eine Beschreibung der Methodik bei der Paketerstellung, um anschließend die resultierenden Technologiepakete in einer Übersicht zusammenzufassen.

5.1.1 Technologiebewertung

Als Kriterien zur Technologiebewertung werden die ermittelten CO₂-Reduzierungspotenziale, die Herstellkosten bei Massenproduktion in 2020 sowie die zeitliche Verfügbarkeit der Technologien herangezogen. Zur Bewertung und zum Vergleich der identifizierten Technologien bietet sich eine graphische Visualisierung an. Abb. 5-2 zeigt die gewählte Darstellungsform exemplarisch für Technologien benzinbetriebener Fahrzeuge des SEG-2. In der Abbildung wurden die Technologien für jede Kraftstoffart und jedes Segment in ein Koordinatensystem eingetragen, welches auf der Abszisse die relative CO₂-Reduzierung in Prozent und auf der Ordinate die Technologiekosten zeigt. Außerdem wurde jeweils die zeitliche Verfügbarkeit gekennzeichnet. Die Technologieportfolios für alle untersuchten Segment-/ Kraftstoffkombinationen sind im Anhang hinterlegt, siehe Abb. 13-11 bis Abb. 13-16. Charakteristisch für alle betrachteten Segmente und Kraftstoffe ist die hohe Anzahl von Technologien im Bereich kleiner CO₂-Reduzierungspotenziale mit geringen und mittleren Kosten. Hohe CO₂-Reduzierungen sind häufig nur zu höheren Kosten zu erreichen, wobei entsprechende Technologien

meist große und komplexe Änderungsumfänge am Fahrzeug oder dem Antrieb zur Folge haben. Während große Änderungen am Fahrzeug oftmals einen Wechsel der Fahrzeugplattform nötig machen, können kleinere Änderungen auch im Rahmen eines Facelifts in ein Fahrzeug integriert werden.

Dies erklärt, warum Technologien mit höheren Potenzialen in vielen Fällen teurer sind und längere Zeiträume bis zur Serieneinführung im Fahrzeug benötigen. Hybrid-Technologien erfordern bislang eine Veränderung der Fahrzeugarchitektur, um die Komponenten des elektrischen Antriebs im Fahrzeug optimal zu integrieren. Vor allem der Full-Hybrid setzt sich in den betrachteten Segmenten mit hohen Kosten von den restlichen in diesem Zeitraum verfügbaren Technologien ab.

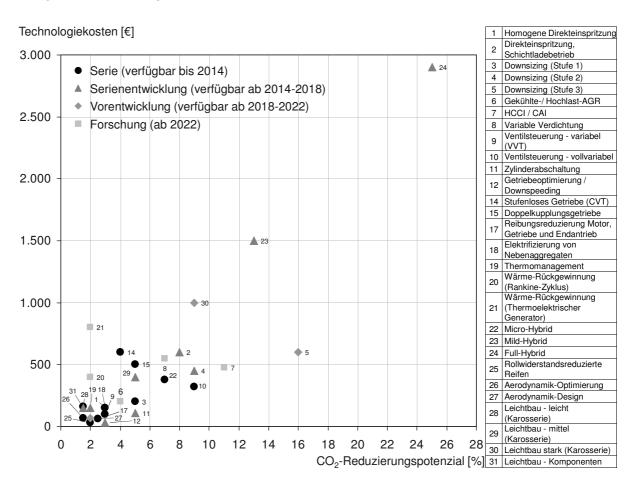


Abb. 5-2: Technologieportfolio für Otto-Motoren im SEG-2

Eine wirtschaftliche Bewertung der Technologien kann auf Grundlage deren Effizienz, definiert nach (Gl. 5-1), über die Relation zwischen CO₂-Reduzierungspotenzial und den Herstellkosten der Technologien erfolgen.

$$E = \frac{P}{\kappa}$$
 GI. 5-1

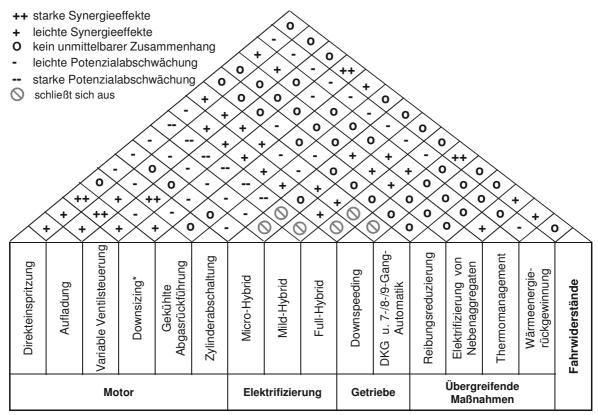
E: Effizienz der Technologie P: CO₂-Reduzierungspotenzial K: Herstellkosten der Technologie

Im Allgemeinen ist es sinnvoll, vorzugsweise Technologien mit einer hohen Effizienz und geringen Mehrkosten ins Fahrzeug zu integrieren. Solche inkrementellen technologischen Schritte können im Gegensatz zu revolutionären Änderungen am Fahrzeug, welche eine Neugestaltung der Fahrzeugplattform erfordern, auch im Rahmen eines Facelifts durchgeführt werden. Anhand der Bewertungsdiagramme können die Technologien leicht hinsichtlich ihrer Effizienz kategorisiert werden, indem Ursprungsgeraden in die Diagramme eingezeichnet werden. Der Kehrwert der Steigung dieser Geraden entspricht dann der Technologieeffizienz. Folglich weisen alle Technologien unterhalb der Geraden eine Effizienz auf, welche mindestens der Vorgabe durch die Effizienzgerade entspricht.

5.1.2 Technologische Wechselwirkungen

Da neben dem CO₂-Reduzierungspotenzial, den Kosten und der zeitlichen Verfügbarkeit auch Wechselwirkungen zwischen Technologien eine bedeutende Rolle spielen, müssen diese im Rahmen der Zusammenstellung der Pakete sowie bei der Ermittlung des jeweiligen Gesamt-Paketpotenzials berücksichtigt werden. Abb. 5-3 zeigt qualitativ die zu erwartenden Wechselwirkungen für die wesentlichen Technologiekombinationen.

Dabei können Synergieeffekte dazu führen, dass zwei Technologien sich aufgrund von konstruktiven Eigenschaften oder der zu Grunde liegenden Wirkungsmechanismen gut ergänzen und gemeinsam in einem Technologiepaket integriert werden sollten. Ein Beispiel für einen starken Synergieeffekt stellen die Technologien "variable Ventilsteuerung" und "Zylinderabschaltung" dar, da die Zylinderabschaltung über eine variable Ventilsteuerung realisiert werden kann und somit kaum Mehraufwand bei einer gemeinsamen Integration entsteht. Eine auftretende Potenzialabschwächung bezeichnet dagegen den Fall, bei dem das errechnete Paket-CO₂-Reduzierungspotenzial einer Technologiekombination aufgrund der technologischen Wechselwirkungen reduziert werden muss. Dieses Kriterium für sich trifft allerdings keine endgültige Aussage darüber, ob eine gemeinsame Integration sinnvoll ist, sondern beschreibt nur, wie die ermittelten Einzelpotenziale in die Gesamtberechnung eingehen. Des Weiteren existieren Kombinationen zwischen Technologien, welche keinen unmittelbaren Zusammenhang aufweisen oder eine gemeinsame Integration nicht möglich ist, da die Technologien sich gegenseitig ausschließen.



^{*} Angesetztes Downsizing-Potenzial beinhaltet bereits Direkteinspritzung, Aufladung und tlw. variable Ventilsteuerung

Abb. 5-3: Qualitative Abschätzung der technologischen Wechselwirkungen

5.1.3 Methodik zur Ermittlung der Technologiepakete

Mit Hilfe der Bewertung im Technologieportfolio sowie unter Berücksichtigung der identifizierten technologischen Wechselwirkungen werden die Technologien in Abstufung nach ihrer Effizienz und zeitlichen Verfügbarkeit geclustert und in fünf Technologiepakete zusammengefasst. Die Zusammenstellung von möglichst günstigen und wirkungsvollen Technologiepaketen kann dabei als iterativer Prozess beschrieben werden. Die Abstufung der zeitlichen Verfügbarkeit der Pakete entspricht den Entwicklungsstadien Serie bis Vorentwicklung, wobei für die Serien- und Vorentwicklung jeweils zwei Pakete, eines mit konventionellen und eines mit Hybrid-Technologien, erstellt wurden. Technologien im Forschungsstadium wurden aufgrund ihrer prognostizierten zeitlichen Verfügbarkeit nicht in den Paketen berücksichtigt und beschreiben die Potenziale zur CO₂-Reduzierung über den Zeitraum 2020 hinaus.

Abb. 5-4 fasst die Methodik bei der Zusammenstellung der Technologiepakete auf Basis des Technologieportfolios sowie das resultierende Ergebnis zusammen. Für das erste Technologiepaket (TP1) wird die höchste Effizienz erreicht, indem die effizientesten Technologien integriert werden. Diese weisen tendenziell einen evolutionären Charakter auf und sind daher kurzfristig zu vergleichsweise geringen Kosten realisierbar, z.B. im Rahmen eines Facelifts. So wird die Technologieauswahl dieses Paktes auf bereits heute verfügbare Technologien mit Serienstatus beschränkt. Dadurch ergibt sich die zeitliche Verfügbarkeit des ersten Technologiepakets im Fahrzeug bis 2014.

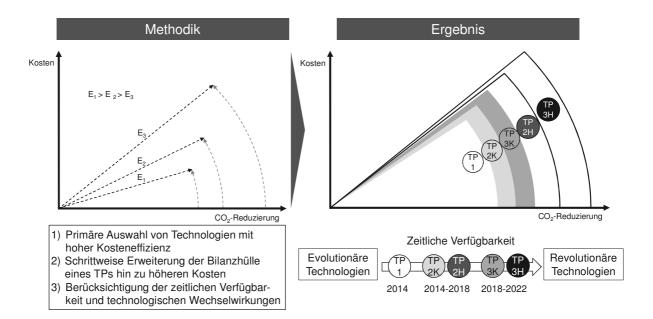


Abb. 5-4: Methodik und qualitatives Ergebnis bei der Zusammenstellung von Technologiepaketen

Zum Erreichen einer höheren CO₂-Reduzierung müssen ab einem bestimmten Punkt Technologien gewählt werden, die teurer sind und eine schlechtere Effizienz aufweisen als das Paket mit zuvor ausgewählten Technologien. Im Fall einer starken Verschlechterung der Paketeffizienz durch Hinzufügen einer neuen Technologie wird diese Technologie zunächst zurückgestellt.

So erreicht das zweite Technologiepaket aus konventionellen Technologien (TP2K) eine höhere Reduzierung an CO₂-Emissionen mit der zweitbesten Paketeffizienz. Dabei werden neben serienreifen Technologien auch Technologien, die sich heute noch in der Serienentwicklung befinden, berücksichtigt. Eine Verfügbarkeit von TP2K wird im Zeitraum zwischen 2014 und 2018 erwartet.

Die nächste Effizienz-Abstufung erfolgt mit dem konventionellen Technologiepaket drei (TP3K), welches die drittbeste Effizienz aufweist. Die Technologien des TP3K haben mehrheitlich einen revolutionären Charakter, da sie größere Änderungsumfänge erfordern sowie hohe CO₂-Reduzierungen zu hohen Kosten ermöglichen. Ein Beispiel stellt die Maßnahme starker Leichtbau dar, bei der eine hohe Gewichtsreduzierung über eine Neugestaltung der Fahrzeugplattform und innovative Materialen erreicht wird. Die Verfügbarkeit der dritten Stufe ist zwischen 2018 und 2022 gegeben, wobei auch Technologien mit dem heutigen Status der Vorentwicklung integriert werden.

Bei der Zusammenstellung der Pakete wird ersichtlich, dass sich die Technologien Mild- und Full-Hybrid bei der Kosteneffizienz hinter den konventionellen motorischen Maßnahmen einreihen und sich ähnliche CO₂-Reduzierungen auch günstiger über die Kombination vieler konventioneller Einzelmaßnahmen erreichen lassen. Hybrid-Technologien ermöglichen zwar eine hohe CO₂-Reduzierung, erfordern jedoch sehr hohe Kosten. Bei strenger Anwendung

der zuvor festgelegten Methodik würden diese Technologien daher nicht berücksichtigt. In der Realität ist trotzdem damit zu rechnen, dass Hybrid-Fahrzeuge signifikante Marktanteile einnehmen werden. Gründe hierfür sind z.B. die Fahrzeughersteller, welche im Rahmen ihrer Entwicklungsstrategie angekündigt haben Hybrid-Technologien nutzen zu wollen, um Erfahrungen im Bereich der Elektromobilität zu sammeln. Außerdem besitzt der Hybridantrieb eine positive Image-Wirkung. Die Möglichkeit zum rein elektrischen Fahren auf der Stufe der Full-Hybridfahrzeuge kann dabei als wichtiges Verkaufsargument genutzt werden, speziell für urbane Gebiete. Die hohen Kosten der Hybrid-Technologien könnten in Zukunft über Skaleneffekte in der eigenen Produktion oder durch Kooperationen unter den in Kapitel 4 angesetzten Kostenbetrag signifikant gesenkt werden. Zur Berücksichtigung dieser erwarteten Hybridisierung wurden die konventionellen Pakete der Stufen zwei und drei jeweils um Hybrid-Technologien zu den Paketen TP2H und TP3H erweitert. Insgesamt weisen das TP2H und das TP3H dadurch die geringsten Kosteneffizienzen der Technologiepakete auf.

Bei der Berechnung der Gesamtpotenziale eines Paketes wurden die einzelnen prozentualen CO₂-Reduzierungen gemäß Gl. 5-2 berechnet. Diese Berechnungsmethodik kommt ebenfalls in vergleichbaren Studien zur Anwendung, vgl. z.B. [TNO11] und [EES10]. In die Berechnung fließt das Produkt der Deltas der relativen CO₂-Reduzierungspotenziale ein. Diese multiplikative Abschätzung erster Ordnung führt jedoch in vielen Fällen dazu, dass das Gesamtpotenzial eines Pakets signifikant zu hoch kalkuliert wird. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn mehrere Technologien aufgrund von Wechselwirkungen die Reduzierung derselben Verluste bzw. Fahrwiderstände zum Ziel haben. Dem wird dadurch Rechnung getragen, dass die Potenziale eines Technologiepaketes durch einen Korrekturfaktor α reduziert werden. Die Ergebnisse der Berechnungsmethodik wurden anhand von Technologieträgern auf Gesamtfahrzeugbasis und den im Folgenden durchgeführten Experteninterviews validiert.

$$P_i = \alpha_i \cdot [1 - \prod_{j=1}^n (1 - \delta_j)]$$
 GI. 5-2

P_i: Paket-CO₂-Reduzierungspotenzial

α_i: Korrekturfaktor (abhängig von Paket und Kraftstoff)

δ_i: relatives CO₂-Reduzierungspotenzial einer Technologie

n: Anzahl der Technologien im Paket

Der Korrekturfaktor korreliert dabei mit den ermittelten Interdependenzen zwischen den Einzelmaßnahmen, siehe Abb. 5-3, sowie mit der Anzahl an Technologien, die in einem Paket zusammengefasst werden. Mit der Anzahl an integrierten Technologien steigt die Wahrscheinlichkeit, dass den Technologiepotenzialen dieselben Verluste und Mechanismen zu Grunde liegen. So wird der Faktor stufenweise vom Paket eins bis zu Paket drei abgesenkt, wodurch das Gesamtpotenzial der Pakete zunehmend abgewertet wird. Eine exakte Bestimmung des Faktors kann nur simulativ für jede einzelne Technologiekombination erfolgen. Daher wurde der Korrekturfaktor hier in Anlehnung an bisherige Studien, z.B. [TNO11], abgeschätzt. Die Korrektur für Benzin-Technologiepakete beträgt zwischen 0,90 und 0,75. Für Diesel-Technologiepakete wurde ein geringerer Faktor zwischen 0,99 und 0,97 angesetzt. Die höhere Korrektur bei Benzin-Paketen ist grundsätzlich darin begründet, dass insgesamt

eine höhere Anzahl von Maßnahmen integriert wurde und viele dieser Maßnahmen auf der Reduzierung von Drossel- und Pumpverlusten im Teillastbereich beruhen. Eine Abschätzung ohne Korrektur würde daher zu einer hohen Überschätzung des Paketpotenzials führen. Für Dieseltechnologien ist dies nicht der Fall, so dass ein geringerer Korrekturfaktor als angemessen erachtet wurde.

5.1.4 Einsparpotenziale der Technologiepakete

Die Ergebnisse des oben beschriebenen iterativen Prozesses werden in den folgenden Abb. 5-5 bis Abb. 5-10 zusammengefasst. Die Darstellungen visualisieren je Segment, welche Technologien in den entsprechenden Paketen zum Einsatz kommen. Zur Bewertung der Technologiepakete werden die resultierenden relativen und absoluten Gesamt-CO₂-Reduzierungen und Gewichtsänderungen sowie die entstehenden Paketkosten angegeben.

Außerdem ist die absolute Paketeffizienz aufgeführt, in welche das Potenzial zur CO₂-Reduzierung in Gramm pro Kilometer einfließt. Diese absolute Größe erlaubt im Gegensatz zur relativen Effizienz eine Bewertung im Hinblick auf die Reduzierung der EU-Flottenemissionen, indem der Bezug zum jeweiligen Referenzfahrzeug der Flotte hergestellt wird. So führt z.B. derselbe Prozentwert einer CO₂-Reduzierung im SEG-3 bei gleichen Kosten zu einer besseren Effizienz als im SEG-1, da aufgrund des höheren Basis-CO₂-Ausstoßes des SEG-3 eine höhere absolute CO₂-Reduzierung erreicht wird.

Die Technologiepakete weisen sichtbar eine Abstufung bezüglich der CO₂-Reduzierung, Kosten und Effizienz auf. So erreicht beispielsweise das TP1 für das Referenzfahrzeug im SEG-1 zu Kosten von 995 € eine CO₂-Reduzierung von 25 g CO₂/km. Über das TP3K kann dagegen zu Kosten von 2.665 € eine CO₂-Reduzierung von 41 g CO₂/km erreicht werden, bei einer geringeren Paketeffizienz bzw. einem reduzierten Verhältnis von Nutzen zu Kosten. Für beide Kraftstoffarten gilt dabei, dass eine Paketstufe in einem höheren Fahrzeugsegment eine höhere Effizienz erreichen kann.

Charakteristisch für die Pakete TP1 bis TP3 ist die dreistufige Einführung von Downsizingund Leichtbau-Maßnahmen, welche von weiteren Technologien flankiert werden. Segmentund kraftstoffspezifische Unterschiede bei den Technologiekombinationen ergeben sich dabei hauptsächlich bei Getriebe-, Einspritz- und Ventiltechnologien. Eine jeweils höhere Reduzierung wird für die Technologiestufen zwei und drei über die zusätzliche Integration von Hybrid-Technologien erreicht. Während im TP2H der Mild-Hybrid eingesetzt wird, schließt das TP3H über die konventionellen Maßnahmen hinaus auch den Full-Hybrid ein. Bei letzterem entfallen näherungsweise die Getriebemaßnahmen, da der serielle und leistungsverzweigte Full-Hybrid bereits über ein adaptiertes und optimiertes Getriebekonzept verfügen.

In Abb. 5-11 werden die CO₂-Einsparpotenziale aller Technologiepakete für benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeuge der Segmente SEG-1 bis SEG-3 mit den spezifischen Zielwerten über der Fahrzeugmasse dargestellt.

Technologie		Max. CO ₂ -: potenzial		TF (20	P1 (14)		P2K -2018)		2H -2018)		23K -2022)		3H -2022)
		В	D	В	D	В	D	В	D	В	D	В	D
	Direkteinspritzung	3,0	x *	✓	\checkmark	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Downsizing (Stufe 1)	4,0	x *	\checkmark	\checkmark	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 2)	8,0	4,0	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 3)	15,0	7,0	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓
Motor	AGR – verbesserte Kühlung und Strömung	×	2,0	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,0	×	✓	-	-	-	-	-	-		-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	8,0	1,0	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Zylinderabschaltung	5,0	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Micro-Hybrid	7,0	6,0		/		✓		-		/		-
Elektrifizierung	Mild-Hybrid	13,0	9,0		-		-	,	/		-		-
	Full-Hybrid	25,0	22,0		-		-		-		-		/
Getriebe	Getriebeoptimierung / Downspeeding	3,0	2,0	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
l'ilbanava ifa and a	Reibungsreduzierung im Antriebsstrang	2,0)	,	/		√	,	/	,	/	,	/
Übergreifende Maßnahmen	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,0		,	/		√	,	/	✓		✓	
	Thermomanagement	2,0)	- ✓		✓	✓		✓		✓		
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	2,0)	,	/		√	,	/	,	/	,	/
	Aerodynamik-Optimierung	1,5	5	,	✓		✓	✓		-		-	
Fahrwiderstände	Aerodynamik-Design	2,0)		-		-		-	✓		✓	
ranimiderstande	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5	5		/		-		-		-		-
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0)		-		✓	,			-		-
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0)		-		-		-	,	/	•	1
	Leichtbau - Komponenten	1,5	5		-		✓	,	/		/	•	/
	Relative Gewichtsänderung [%]			-1,6	-1,5	-7,5	-8	-5	-5,5	-12,8	-13,3	-5,3	-5,8
Gewicht	Absolute Gewichtsänderung [kg]		-17	-17	-80	-96	-53	-66	-137	-159	-57	-103
	Flotten-Gewicht [kg]	1.067	1.194	1.050	1.176	987	1.098	1.014	1.128	930	1.035	1.010	1.125
Berechnung	Korrekturfaktor			0,9	0,99	0,8	0,98	0,8	0,98	0,75	0,97	0,8	0,98
	Relatives CO ₂ -Potenzial [%]			19,6	14,9	28,6	25,1	31,9	27,4	32,6	32	42,4	42,4
CO ₂ -Reduzierung	Absolutes CO ₂ -Potenzial [g/k			25	17	36	28	41	30	41	36	54	47
	CO ₂ -Flotte [g/km]	127	111	102	94	91	83	86	81	86	75	73	64
Kosten	Gesamtkosten [€]			995	780	1.965	1.490	3.015	2.015	2.665	2.350	4.585	4.345
Kosien	Mehrpreis [%]	13.000€	15.500 €	7,7	5,0	15,1	9,6	23,2	13,0	20,5	15,2	35,3	28,0
Effizienz	Paketeffizienz [g/km pro 1.000 €	<u> </u>		25.0	21,2	18,5	18,7	13,4	15,1	15,5	15,1	11,7	10.8

Abb. 5-5: Technologiepakete für SEG-1; mit B: Benzin, D: Diesel, * Stand der Technik

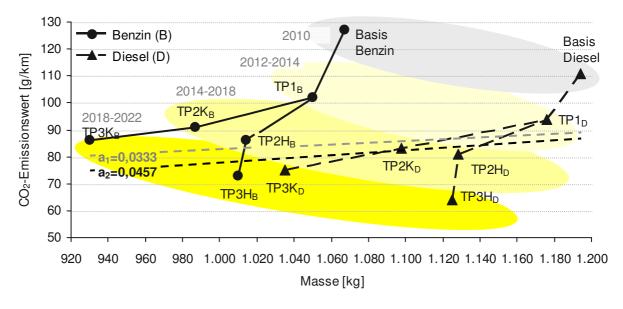


Abb. 5-6: Visualisierung der CO₂-Reduzierung für die Technologiepakete des SEG-1

		Max. CO ₂ -S		TF			P2K		2H		3K	TP	
Technologie		potenzial [%		,	14)	`	-2018)	`	-2018)	· ·	-2022)	`	-2022)
	Disalstainansitruma	В	D **	В	D ✓	B ✓	D	В	D	В	D	В	D
	Direkteinspritzung	3,0	x*	V	✓ ✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Downsizing (Stufe 1)	5,0		~	~	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 2)	9,0	4,0	-	-	•	V	V	~	-	-	-	- /
	Downsizing (Stufe 3) AGR – verbesserte Kühlung	16,0	7,0	-	-	-	-	-	-	· ·	~	V	✓
Motor	und Strömung	×	2,0	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,0	×	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	9,0	1,0	-	-	\checkmark	-	\checkmark	-	\checkmark	-	\checkmark	-
	Zylinderabschaltung	5,0	×	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Micro-Hybrid	7,0	6,0	,	1	,	/		-	,	1		
Elektrifizierung	Mild-Hybrid	13,0	9,0		-	-		,	1		-		
	Full-Hybrid	25,0	22,0		-		-		-		-	•	
Getriebe	Getriebeoptimierung / Downspeeding	3,0	2,0	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
Üle	Reibungsreduzierung im Antriebsstrang	2,5		✓ ✓		✓		✓		✓			
Übergreifende Maßnahmen	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,0		,	/	,	/	,	/	,	/	,	/
	Thermomanagement	2,0			-	✓		✓		✓		✓	
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	2,0		,	/	,	✓		/	,	/	,	/
	Aerodynamik-Optimierung	1,5		,	1	,	/	,	1	-		-	
	Aerodynamik-Design	2,0			-		-		-	✓		✓	
Fahrwiderstände	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5		,	1		-		-		-		
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0			-		/	,	/		-		
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0			-		-		-	,	/		/
	Leichtbau - Komponenten	1,5			-		/	•	/	•	/	,	
	Relative Gewichtsänderung [%]			-1,6	-1,5	-7,5	-8	-5	-5,5	-12,8	-13,3	-5,3	-5,8
Gewicht	Absolute Gewichtsänderung [kg			-17	-17	-105	-126	-70	-87	-179	-208	-74	-90
	Flotten-Gewicht [kg]	1.396	1.573	1.374	1.549	1.291	1.447	1.326	1.486	1.217	1.364	1.322	1.482
Berechnung	Korrekturfaktor			0,9	0,99	0,8	0,98	0,8	0,98	0,75	0,97	0,8	0,98
	Relatives CO ₂ -Potenzial [%]			20,6	15,3	32,5	25,4	35,5	27,8	35,8	32,4	45,2	42,7
CO ₂ -Reduzierung	Absolutes CO ₂ -Potenzial [g/k	m]		33	22	52	37	56	40	57	47	72	62
	CO ₂ -Flotte [g/km]	159	145	126	123	107	108	103	105	102	98	87	83
Veeten	Gesamtkosten [€]			1.145	850	2.295	1.690	3.415	2.815	3.045	2.690	5.535	5.185
Kosten	Mehrpreis [%]	23.000 € 2	5.500 €	5,0	3,3	10,0	6,6	14,8	11,0	13,2	10,5	24,1	20,3
Effizienz	Paketeffizienz [g/km pro 1.000 €	71		28.6	26.1	22.5	21.8	16.5	14.3	18.7		13.0	11.9

Abb. 5-7: Technologiepakete für SEG-2; mit B: Benzin, D: Diesel, * Stand der Technik

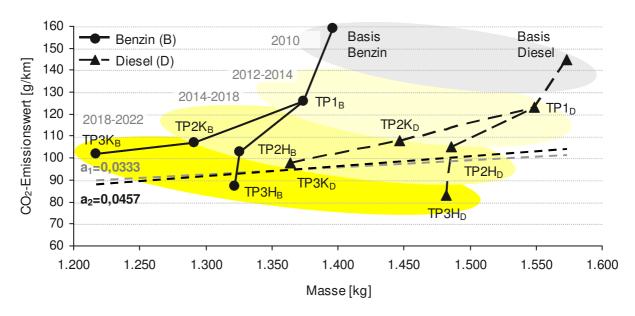


Abb. 5-8: Visualisierung der CO₂-Reduzierung für die Technologiepakete des SEG-2

Abb. 5-9: Technologiepakete für SEG-3; mit B: Benzin, D: Diesel, * Stand der Technik

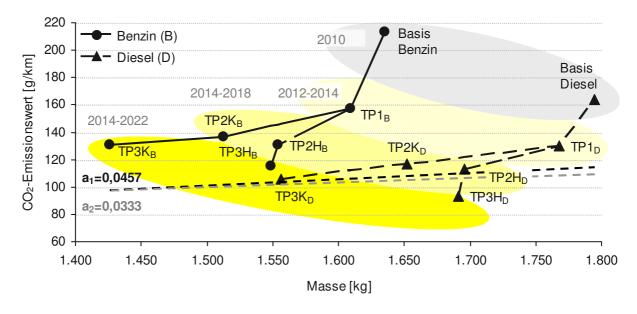


Abb. 5-10: Visualisierung der CO₂-Reduzierung für die Technologiepakete des SEG-3

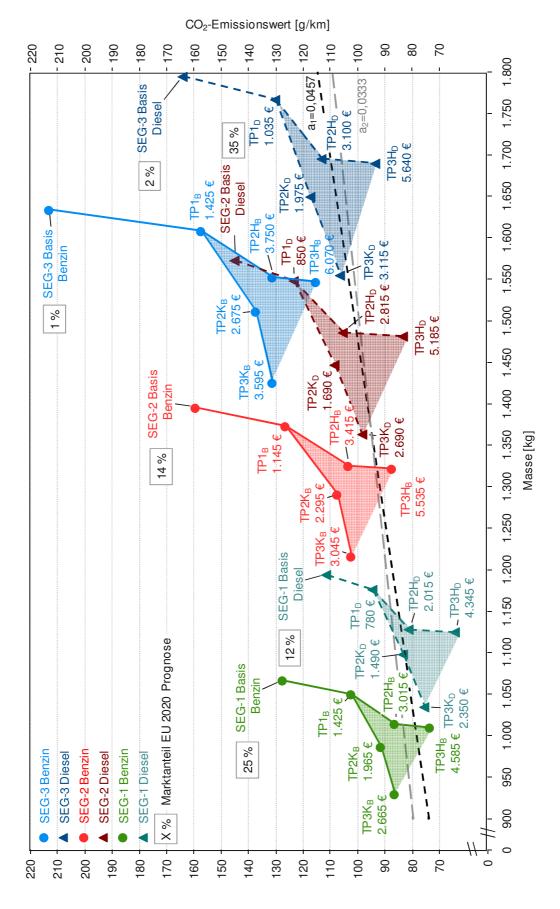


Abb. 5-11: Visualisierung der Technologiestufen über der Fahrzeugmasse

5.2 Entwicklungsszenarien und CO₂-Flottenreduzierungspotenziale

Nachdem im vorherigen Kapitel die rein technologische Seite betrachtet und unter Bildung von effizienten Technologiepaketen bewertet wurde, müssen diese Pakete im Folgenden auf die europäische Marktzusammensetzung projiziert werden. Das Ziel ist dabei die Abschätzung der durchschnittlichen technologischen Entwicklung der EU-Flotte in 2020. In der Realität ist zu erwarten, dass sich eine Vielzahl unterschiedlicher Technologiekombinationen zur CO₂-Reduzierung bis 2020 auf dem europäischen Fahrzeugmarkt durchsetzen wird. Dabei ergibt sich der Lösungsraum für mögliche Marktpenetrationsszenarien der Technologien im Wesentlichen über die wechselseitige Einflussnahme von Kunden, Herstellern und der Politik bzw. dem Gesetzgeber, siehe Abb. 5-12.

Während der Kunde vor allem in Abhängigkeit von Kraftstoffpreisen durch seine Kaufentscheidung auf CO₂-Technologien Einfluss nimmt, kann der Gesetzgeber über die Festlegung von CO₂-Grenzwerten bzw. über die Ausgestaltung entsprechender Rahmenbedingungen Einfluss nehmen. Die Fahrzeughersteller werden dagegen dem Kunden voraussichtlich ein breites Portfolio an Technologien gekoppelt an verschiedene Motorisierungen anbieten, aus dem er entsprechend seinen Anforderungen wählen kann. Außerdem entscheiden sich die Hersteller im Rahmen ihrer spezifischen Entwicklungsstrategie für bestimmte CO₂-Technologie-Kombinationen, z.B. anhand vorhandener Kernkompetenzen und Kooperationen mit anderen Herstellern sowie Zulieferern.

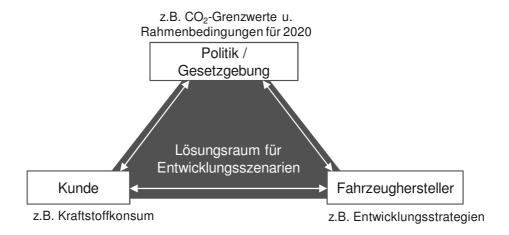


Abb. 5-12: Lösungsraum für Entwickungsszenarien der CO₂-Technologien in 2020 [In Anlehnung an [MOC10]]

Insgesamt ist davon auszugehen, dass im Durchschnitt vor allem kosteneffiziente Technologiekonfigurationen durch die Hersteller ausgewählt werden. Die definierten Pakete stellen somit den wahrscheinlichen Durchschnitt über alle heterogenen Fahrzeughersteller dar und geben bei Anwendung auf die europäische Fahrzeugflotte eine gute Abschätzung zum technologischen Potenzial sowie den resultierenden Kosten der CO₂-Reduzierung bis 2020 ab.

Das theoretisch maximal realisierbare Flottenpotenzial der konzipierten Technologiestufen kann über Entwicklungsszenarien aufgezeigt werden, welche jeweils eine 100-prozentige Marktpenetration der Technologiepakete in jedem der Fahrzeugsegmente für Benzin- und Diesel-Kraftstoffe beinhalten, siehe Abb. 5-13. Die Szenarien wurden dabei sowohl für die derzeitige Marktzusammensetzung in 2010 als auch für das prognostizierte Marktszenario in 2020 berechnet. Für die Technologiestufen TP2 und TP3 wurden sowohl der konventionelle Pfad, als auch der Hybrid-Pfad aufgezeigt, welcher die Mild- und Full-Hybride beinhaltet. Der CO₂-Basiswert der Fahrzeugflotte betrug im Jahr 2010 141 g CO₂/km. Durch die prognostizierten Veränderungen der Marktzusammensetzung in 2020 reduziert sich dieser Wert ohne weitere technologische Maßnahmen an Benzin- oder Diesel- Fahrzeugen bereits auf ca. 132 g CO₂/km. Im Wesentlichen beinhaltet die dabei zu Grunde gelegte Marktprognose einen Trend hin zu kleineren Fahrzeugen sowie einen Anteil an Elektrofahrzeugen und Plugin-Hybriden von insgesamt 6 %.

Die unterste Grenze der technisch realisierbaren CO₂-Reduzierung für den Zeithorizont um 2020 liegt bei 100 % Paketeinsatz (TP3) somit unter Annahme der prognostizierten Marktverteilung für 2020 bei 90 g CO₂/km (TP3K) mit konventionellen Technologien und bei 78 g CO₂/km (TP3H) mit Hilfe von Hybrid-Technologien. Die durchschnittlichen Technologie-Herstellkosten pro optimiertem Fahrzeug belaufen sich dabei für den konventionellen Pfad im Durchschnitt auf 2.687 € und für den Hybrid-Pfad auf 4.981 €.

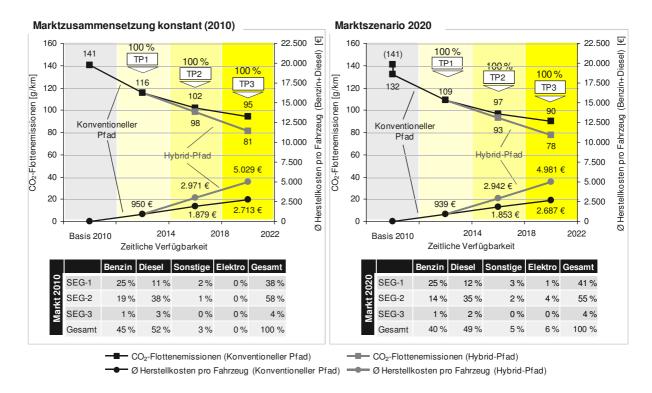
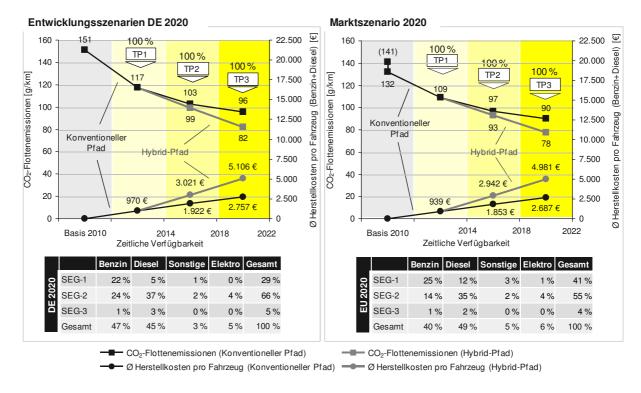


Abb. 5-13: EU- Entwicklungsszenarien mit jeweils 100 % Paketeinsatz (TP1 bis TP3H) in 2020



Die CO₂-Reduzierungspotenziale der EU im Vergleich mit Deutschland zeigt Abb. 5-14.

Abb. 5-14: Vergleich von Entwicklungsszenarien für Europa und Deutschland 2020

In diesem Vergleich wird deutlich, dass aufgrund der Differenzen in der Marktzusammensetzung in Deutschland nur ein höherer CO₂-Flottenwert zu höheren Herstellkosten im Vergleich zur EU-Flotte erreicht werden kann. So liegt der mit konventionellen Mitteln technisch maximal erreichbare CO₂-Flottenwert für Deutschland zwischen 96 g CO₂/km und 82 g CO₂/km bei 100 % Paketeinsatz.

Da die ermittelten Technologiekombinationen auch Leichtbaumaßnahmen enthalten, ist eine Betrachtung der Gewichtsveränderungen der Fahrzeugflotten in Folge der Technologiepakete sinnvoll. Insbesondere im Hinblick auf die derzeitige massenbasierte EU-Grenzwertregelung ist dies relevant, da eine signifikante Gewichtsreduzierung einen deutlich verschärften CO₂-Grenzwert zur Folge hat. Abb. 5-15 zeigt diesbezüglich die Technologieszenarien mit 100-prozentigem Einsatz der Technologiepakete für Deutschland und die EU über der Fahrzeugmasse.

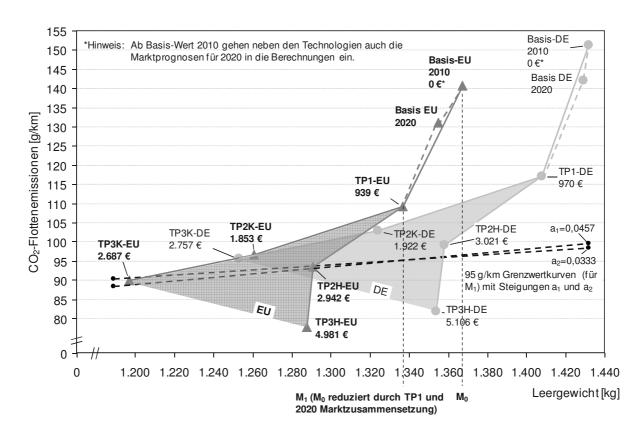


Abb. 5-15: Technologieszenarien mit 100 % Paketen über der Fahrzeugmasse in Europa und Deutschland

Es wurden zwei hypothetische Grenzwertkurven für 2020 eingezeichnet, wobei als Bezugsmasse das Gewicht des ersten Technologiepaketes gewählt und die aktuell gültige Geradensteigung zu Grunde gelegt wurde. Die geplante Zielvorgabe der EU für 2020 beträgt 95 g CO₂/km. Eine Anwendung des ersten Technologiepaketes in der Fahrzeugflotte ist nicht ausreichend, um den Grenzwert von 95 g CO₂/km zu erreichen. So muss mindestens auf die zweite bzw. dritte Technologiestufe zurückgegriffen werden. Die Entwicklungsszenarien für die deutsche Fahrzeugflotte zeichnen sich neben geringeren CO₂-Reduzierungspotenzialen vor allem durch ein höheres Flottengewicht aus. Für 2020 wird erwartet, dass der Durchschnitt der technologischen Entwicklung innerhalb des markierten Bereichs in dem Szenariotrichter zwischen konventionellem und dem Hybrid-Pfad verlaufen wird.

In der Darstellung wird ein Vorteil des Hybridentwicklungspfades deutlich. Da Hybridantriebe eine Gewichtszunahme zur Folge haben, gelten für sie abgeschwächte Grenzwerte, so dass der Hybrid-Pfad im Hinblick auf CO₂-Grenzwerte und Strafzahlungen nach der derzeitigen Regelung Vorteile aufweist. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Bezugsmasse M₀ alle drei Jahre angepasst werden kann. Als Konsequenz würde der gesetzliche Grenzwert einer Zunahme des Flottenleergewichts mit Abstand folgen. Dies resultiert in einem hypothetischen Extremfall, in dem sich eine aufwärtsgerichtete Gewichtsspirale entwickelt, ausgelöst durch die aktuell massenbasierte Grenzwertregelung.

5.3 Einflussanalyse der Segment-/ Kraftstoffkombinationen

Die aufgezeigten Entwicklungsszenarien betrachten den 100-prozentigen Einsatz der Technologiepakete über die gesamte Flotte. Nun werden die CO₂-Flottenreduzierungen eines 100-prozentigen Paketeinsatzes für jede der einzelnen Kombinationen dargestellt, um auch die Potenziale der einzelnen Segment-/ Kraftstoffkombinationen zu untersuchen, vgl. Abb. 5-16.

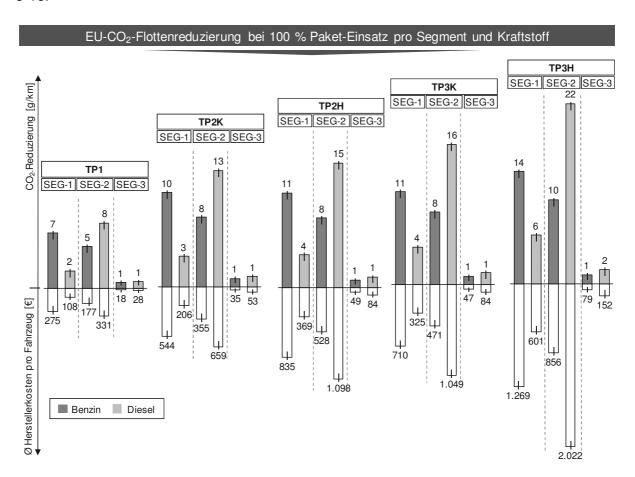


Abb. 5-16: Detailanalyse der EU-CO₂-Flottenreduzierungspotenziale

Die EU-Flottenemissionen können z.B. um insgesamt 22 g CO₂/km gesenkt werden, wenn in allen dieselbetriebenen Fahrzeugen des SEG-2 das Technologiepaket TP3H eingesetzt würde. Umgelegt auf alle benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeuge würde dies zu zusätzlichen durchschnittlichen Herstellkosten von ca. 2.000 € pro Fahrzeug führen. Ein 100-prozentiger Einsatz dieser Technologien bei dieselbetriebenen Fahrzeugen im SEG-3 könnte dagegen lediglich die europäischen Flottenemissionen um 2 g CO₂/km reduzieren, wobei durchschnittliche Herstellkosten von ca. 150 € anfallen würden.

Die Abb. 5-16 zeigt anhand der Kombination von Fahrzeugsegment und Technologiepotenzialen, dass die größten Hebel zur CO₂-Reduzierung im SEG-1 für ottomotorisch angetriebene Fahrzeuge und im SEG-2 für dieselmotorisch angetriebene Fahrzeuge liegen, wobei die größte CO₂-Reduzierung durch das TP3H in allen Klassen erreicht werden kann. Nutzt man

die einzelnen Stellhebel in den Segment-Kraftstoffkombinationen unter Berücksichtigung der jeweiligen Effizienz, also dem Verhältnis aus CO₂-Reduzierung und Herstellkosten, optimal aus, so lässt sich theoretisch bei 100 % Paketeinsatz in 2020 ein europäischer CO₂-Flottengrenzwert von 95 g CO₂/km für durchschnittlich ca. 2.000 € Herstellkosten bei 1.250 kg pro Fahrzeug aus volkswirtschaftlicher Sicht erreichen. Hierzu wurden die Technologiepakete mit der besten Kosteneffizienz sukzessive nacheinander auf die europäische Flotte angewandt, um die unterste theoretische Kostenschranke zum Erreichen des diskutierten Grenzwertes aus einer Systemperspektive zu erreichen. Die Berechnung zeigt die Wichtigkeit der langfristigen Anpassung der Referenzmasse M₀, da andernfalls die Aufwände zur Erzielung des Flottenziels steigen.

5.4 Zwischenfazit

Im dritten Arbeitspunkt wurde zunächst eine Methodik entwickelt, mit welcher die Leistungsfähigkeit einzelner Technologien zur CO₂-Reduzierung in Technologiepaketen abgeschätzt werden kann. Die Methodik basiert auf einer technischen und wirtschaftlichen Problembetrachtung, welche die Wechselwirkungen zwischen den Technologien berücksichtigt und zunächst auf evolutionären Technologien aufbaut, bevor revolutionäre Lösungen zur CO₂-Reduzierung betrachtet werden.

Als Ergebnis der Anwendung dieser Methodik auf die Technologieportfolios der benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeuge der Segmente SEG-1 bis SEG-3 wurde jeweils eine Technologieroadmap für den Einsatz bis zum Jahr 2020 entwickelt. Für jedes aufeinander aufbauende Technologiepaket wurden das aggregierte CO₂-Einsparpotenzial, die Gewichtsänderung und die korrespondierenden Kosten ermittelt. Aufgrund des besonderen Kosten-/Nutzenverhältnisses sowie der unterschiedlichen Fahrzeugherstellerstrategien und Kompetenzen in Bezug auf Hybridantriebstränge wurden Szenarien mit und ohne Einsatz der Hybridtechnologie abgeleitet.

Im nächsten Schritt wurden die ermittelten CO₂-Reduzierungspotenziale der Technologiepakete auf die gesamte Flotte angewendet. Hierbei zeigt sich, ausgehend von der für das Jahr 2020 prognostizierten Segmentverteilung, dass die CO₂-Emissionen theoretisch mit 100 % Einführung eines 2.700 € teuren Maßnahmenpakets maximal auf 90 g CO₂/km bei durchschnittlich 1.197 kg Masse je Fahrzeug abgesenkt werden könnten. Würde jedes benzinund dieselbetriebene Fahrzeug mit einem Full-Hybrid Antriebstrang ausgestattet werden, könnten die CO₂-Emissionen theoretisch auf 78 g CO₂/km bei durchschnittlich 1.288 kg und ca. zusätzlichen 5.000 € Herstellkosten je Fahrzeug reduziert werden. Diese Werte sind als rein technische untere Grenze bei der prognostizierten Marktverteilung zu verstehen.

Als Kernergebnis des dritten Arbeitspunktes wurden das aggregierte technische Potenzial und die Kosten je Technologiepaket berechnet. Das CO₂-Reduzierungspotenzial bestimmt die technischen Grenzen für einen realisierbaren CO₂-Flottengrenzwert bis zum Jahr 2020.

6 Validierung der bisherigen Ergebnisse durch Experteninterviews (AP4)

Zur Validierung der Zwischenergebnisse aus den bisherigen Arbeitspunkten wurden im Rahmen einer Primärdatenerhebung Interviews mit Experten aus der deutschen Automobilindustrie geführt. Der Expertenaustausch zur Validierung der bisherigen Technologiebewertung und Marktprognose wurde hierbei mit Fahrzeugherstellern sowie Systemlieferanten realisiert.

Im vorliegenden Kapitel wird zunächst die methodische Vorgehensweise zur Durchführung der Experteninterviews beschrieben und anschließend die Kernergebnisse der individuell geführten Interviews in aggregierter Form zusammengefasst.

6.1 Methodische Vorgehensweise der Experteninterviews

Die methodische Vorgehensweise des Interviewprozesses wird durch Abb. 6-1 visualisiert. In enger Abstimmung mit dem BMWi wurden relevante Unternehmen als mögliche Interviewpartner identifiziert und im Anschluss angefragt. Zur Vorbereitung der Gespräche wurde ein Interview-Leitfaden erstellt, der nach Überprüfung durch den Auftraggeber an die jeweiligen Interviewteilnehmer versendet wurde.

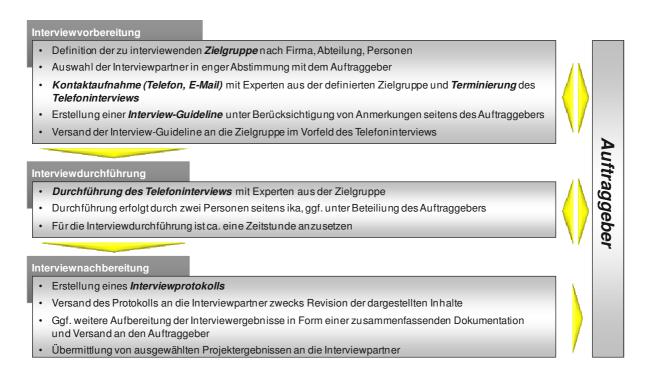


Abb. 6-1 Methodische Vorgehensweise zur Durchführung der Experteninterviews

Der Interviewleitfaden besteht aus vier thematisch gegliederten Teilen. Nach einer detaillierten Einleitung in das Themenfeld sowie der technologischen Definition der Referenzfahrzeuge werden die Zwischenergebnisse der technologischen und wirtschaftlichen Potenzialanalyse vorgestellt. Die Interviewteilnehmer sollten im Rahmen der Potenzialanalyse, nach Rücksprache mit ihren Fachabteilungen, die ermittelten Werte verifizieren oder gegebenen-

falls Veränderungen vornehmen. Diese konnte entweder in Absolutwerten oder in einer Relativbewertung erfolgen. Im Anschluss wird die Marktentwicklung der Fahrzeugsegmente und der zugehörigen Antriebskonzepte im Jahr 2020 vorgestellt und mit den Einschätzungen der Interviewteilnehmer abgeglichen. Nachfolgend wurden den Interviewteilnehmern offene Fragen bezüglich der technologischen Herausforderungen und der EU-Verordnung gestellt, die im Interviewtermin ausführlich diskutiert wurden. Abschließend wurden sonstige offene Fragen angesprochen. Der Interviewleitfaden ist im Anhang in den Abb. 13-17 bis Abb. 13-36 dokumentiert.

Nach der Durchführung der Interviews wurden die Gesprächsinhalte ausgewertet und zusammengefasst. Die Erkenntnisse, die über die Inhalte des Leitfadens hinausgehen und trotzdem von Relevanz sind, fließen in den AP5 "Strategische Implikationen für die deutsche Automobilindustrie" ein und werden somit in der Gesamtstudie berücksichtigt.

6.2 Ergebnisse der Technologiebewertung

Im Rahmen der Technologiebewertung wurde den Unternehmen die methodische Vorgehensweise zur Ermittlung der Technologiepakete sowie die zugehörigen CO₂-Einsparpotenziale je Technologiekombination vorgestellt. Nach Rücksprache mit den jeweiligen Fachabteilungen konnten die Interviewteilnehmer ein detailliertes Feedback bestehend aus Einzeltechnologiebewertungen und Gesamtpotenzialen mit zugehörigen Kostenabschätzungen übermitteln. Insgesamt wurde die Gesamthöhe des CO₂-Einsparpotenzials je Technologiepaket durch die Interviewteilnehmer validiert. Die Wirksamkeit einzelner Technologien bzw. die gegenseitige Beeinflussung wurde im Detail unterschiedlich bewertet. Darüber hinaus wurden weitere vielfältige Technologiekombinationen diskutiert.

Es gilt zu beachten, dass jeder Fahrzeughersteller auf Basis seiner individuellen Ausgangsposition und seines spezifischen Zielwertes eine unterschiedliche Technologiestrategie verfolgt. Die jeweiligen Technologiestrategien berücksichtigen die unternehmensspezifischen Stärken z.B. im Thermomanagement oder in der Getriebetechnologie. Dies führt dazu, dass abweichend von den hier diskutierten Technologiepaketen bei den einzelnen Unternehmen weitere Technologiekombinationen mit früherem bzw. späterem Einsatz von Maßnahmen im Markt erhältlich sein werden. Maßnahmen wie Leichtlaufreifen wurden z.B. im Zeitraum bis 2012 bei einigen Unternehmen bereits für das komplette Produktportfolio eingeführt.

Ein intensiver Austausch wurde zu den Technologien der Elektrifizierung des Antriebsstrangs und des Leichtbaus durchgeführt. Die meisten Unternehmen teilen die Ansicht, dass eine Erzielung der jeweiligen flottenspezifischen Grenzwerte ohne eine Elektrifizierung nicht oder nur schwer zu erreichen ist. Die Umsetzung und die Ausmaße der Elektrifizierung im jeweiligen Portfolio unterscheiden sich jedoch deutlich. Während mehrere Unternehmen auf die gesamte Technologiebreite setzen und diese den Kunden in unterschiedlichsten Ausführungen anbieten werden, streben ausgewählten Unternehmen Technologiesprünge vom Mikro-Hybrid zum Full-Hybrid unter Auslassung der Mild-Hybridtechnologie an. So könnten die Forschungsanstrengungen auf diese Varianten fokussiert werden. Dies führt dazu, dass die

Funktionalität der fokussierten Variante effizienter wird und bei begrenzten F&E-Budgets auch die Aufwendungen auf eine größere Stückzahl umgelegt werden können. Vor dem Hintergrund der hohen Systemkosten sahen alle Interviewteilnehmer den Markterfolg eines Full-Hybrid im SEG-1 als kritisch an.

Bezüglich der Wirksamkeit und Kosteneffizienz von Leichtbaumaßnahmen wurden ebenfalls verschiedene Positionen mit den Interviewteilnehmern diskutiert. Alle Interviewpartner sehen Chancen darin, Potenziale im Leichtbau zu holen, die jedoch im Konflikt mit weiteren Gesamtfahrzeuganforderungen wie Sicherheit, Komfort- oder Akustikgestaltung stünden. Die zu erwartenden Leichtbaumaßnahmen würden insbesondere als evolutionäre Weiterentwicklung der aktuellen Fahrzeugkonzepte umgesetzt. Ein intensiver Einsatz innovativer Materialen, z.B. CFK oder GFK, wird sich nur in Nischenanwendungen und nicht in der breiten Masse widerspiegeln. Zur Erfüllung der höchsten genannten Leichtbauziele im SEG-1 ist es unter Umständen nötig, die Fahrzeuggröße in Länge und Breite zu reduzieren. Dies stehe jedoch im Konflikt mit Kundenwünschen nach Fahrzeugen mit vergrößertem Platzangebot.

Die Interviewergebnisse bezüglich der Herstellkosten fielen insgesamt sehr volatil aus. Konventionelle Maßnahmen aus dem TP1, die heute bereits teilweise in der Fahrzeugflotte etabliert sind, bewerten die Interviewpartner leicht günstiger bzw. leicht teurer. Die Kosten für die konventionelle Technologiepakete TP2K und TP3K werden gleich bzw. leicht erhöht abgeschätzt. Die Kosten für "revolutionäre", derzeit noch nicht in Masse produzierte Technologien z.B. Mild und Full-Hybride, werden von den interviewten Fahrzeugherstellern mit Kostenaufschlägen zwischen 30 % und 100 % bewertet. Diese betonen hierbei die hohen Herausforderungen bei der Integration innovativer Technologien in das Gesamtfahrzeug und den damit verbundenen Kostendruck im Volumensegment.

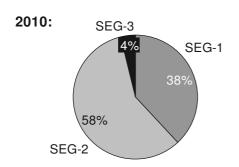
Der ermittelte Zeithorizont für die Einführung bzw. Verfügbarkeit der Technologien in der Masse wurde von den Interviewpartnern stets als realistisch eingeschätzt.

Für die weiteren Berechnungen werden die ermittelten Technologiekombinationen aufgrund des Feedbacks beibehalten. Die Interviews bestätigten überdies die ermittelten technologischen Gesamtpotenziale zur Reduzierung der CO₂-Emissionen. Im Hinblick auf die Kosten decken sich die in den Interviews angegebenen Herstellkosten mit den Maximalwerten der Metastudie. Da die internationalen Wettbewerber hier als Benchmark für die elektrifizierten Antriebstränge anzusehen sind und entsprechende funktionsfähige Lösungen am Markt anbieten, werden die vorgestellten Herstellkosten für die weiteren Berechnungen beibehalten. Die im AP2 eingeführten Herstellkosten entsprechen dem Herstellkostenniveau, das durchschnittlich für die europäische Automobilindustrie angesetzt werden kann. Da deutsche Unternehmen, insbesondere Premiumhersteller, häufig höhere Anforderungen an die Realisierung einer Funktion, z.B. dem Hybridantrieb setzen, resultiert dies in höheren Entwicklungsund Herstellkosten für diese Unternehmen. Dieser Zusammenhang wird im Folgenden in den strategischen Implikationen aufgegriffen.

6.3 Ergebnisse der Marktprognose

6

Im Rahmen der Befragung zur Marktentwicklung wurden mit den Interviewteilnehmern die Einschätzungen zur zukünftigen Segmentverteilung sowie Antriebstrangkonzeptverteilung ausgetauscht. Obwohl einige OEM die gleichen Marktforschungsinstitute beauftragen und diese sogar als Quelle neben internen Prognosen heranziehen, gaben diese zum Teil gegenläufige Zukunftsprognosen ab. Insgesamt weicht der Durchschnitt der Ergebnisse, vgl. Abb. 6-2, nur gering vom Stand im Jahr 2010 ab. Im Interviewbeispiel 1 wird ein deutliches Wachstum im SEG-2 erwartet, z.B. durch den Trend zu kleinen Geländewagen und Fahrzeugen mit vergrößertem Innenraum. Im Interviewbeispiel 2 hingegen wird zukünftig ein deutlich stärkeres Kleinstwagengeschäft prognostiziert.



2020:	ika-Pro	anoco	Ø Interviewteilnehmer							
	IKA-F10	igilose	Bsp.1	Bsp.2	Ø					
SEG-1	41 %	(+ 3 %)	31 %	42%	37%	(- 1 %)				
SEG-2	55 %	(-3%)	66 %	57%	60 %	(+ 2 %)				
SEG-3	4%	(± 0 %)	3%	1 %	3%	(- 1 %)				

Abb. 6-2 Interviewergebnisse zur prognostizierten Segmentverteilung 2020 in Europa

Auf der nächsten Detailstufe wurden die Einschätzungen der Interviewteilnehmer zur zukünftigen Antriebskonzeptverteilung je Fahrzeugsegment erfragt. Die größte Herausforderung liegt hierbei in der Abschätzung des Anteils der elektrischen Antriebe. Die Abschätzung des EV-Anteils divergiert je nach Interviewpartner. Die Prognosen wurden mit Anteilen zwischen 1 % und 12 % angegeben. Einige Interviewpartner sehen für die Zukunft einen Nachfragerückgang an Diesel-Fahrzeugen durch erhöhte Kraftstoffpreise und Steuern als möglich an. Die Detailergebnisse fasst Abb. 6-3 zusammen. Aufgrund der Größe und Zusammensetzung der Interviewgruppe muss berücksichtigt werden, dass aus den Ergebnissen keine statistische Signifikanz abgeleitet werden kann.

Status 2010

2010	Benzin	Diesel	EV*	Sonst.	Σ	
SEG-1	67%	28 %	0 %	5%	100%	
SEG-2	32%	66 %	0 %	2%	100%	
SEG-3	33 %	67 %	0%	0%	100%	

Ø Interviewteilnehmer-Prognose:

202	20	Ber	nzin	Die	sel	EV	*	Sonst.		Σ
SE	G-1	6	7%	2	3%		4%	6%		100%
Min	Max	65%	70%	20%	28%	1%	8%	4%	7%	
SE	G-2	3	5%	5	6%		6%		3%	100%
Min	Max	30%	43%	43%	65%	2%	12%	2%	4%	
SE	SEG-3 40 %		0 %	5	2%		6%		2%	100%
Min	Max	34%	57%	35%	65%	1%	10%	0%	4%	

Abb. 6-3: Interviewergebnisse zur prognostizierten Antriebskonzeptverteilung 2020
* EV entsprechen BEV im SEG-1 und PHEV im SEG-2 und SEG-3

Alle Interviewteilnehmer teilen die Ansicht, dass der klar dominierende Anteil der Antriebskonzepte auch in 2020 durch konventionelle Benzin- und Dieselaggregate dargestellt wird. Dennoch ist für viele Unternehmen ein vergleichsweise hoher Anteil an elektrifizierten Fahrzeugen ein wichtiges Standbein zur Erzielung des 95 g-Ziels, so dass für signifikante Anteile der Modellpalette BEV- und PHEV-Konzepte entwickelt werden. Trotz der klaren langfristigen Ausrichtung besteht bei allen Interviewpartnern eine zurückhaltende Einschätzung, ob im Jahr 2020 bereits tatsächlich ein signifikanter Markterfolg generiert werden kann.

6.4 Ergebnisse der offenen Fragen

Im Anschluss an den Abgleich der technischen Leistungsfähigkeit wurden den Interviewteilnehmern offene Fragen zu den beiden Themenfeldern Technologie und zukünftige EU-Verordnung gestellt. Zunächst wurden die Bereiche Ökoinnovationen, technologische Hürden sowie Zyklus-/ und Modellpläne thematisiert, bevor auf die EU-Verordnung mit den Themen der Grenzwertgeraden, Parameter und Flexibilisierungsmaßnahmen übergeleitet wurde.

Technologie: Ökoinnovation

Neben den bereits vorgestellten und ausführlich diskutierten technologischen Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen im NEFZ Zyklus gibt es weitere Technologien, die dazu beitragen, den Realverbrauch zu senken, aber nicht im Zyklus erfasst werden. Als Beispiele für solche Maßnahmen können LED-Tagfahrlicht, effizientere Generatoren, Motorwarmlaufsysteme oder vorausschauende Fahrerassistenzsysteme angeführt werden.

Die Europäische Kommission sieht in der EU-Verordnung ein Konzept zur Anrechnung von Effizienzpotenzialen außerhalb des NEFZ vor. Diese sogenannten Ökoinnovationen werden im Kern über eine nachgewiesene Emissionsreduktion von mind. 1 g CO₂/km und einen Neuheitsgrad der Erfindung definiert, beschrieben durch eine niedrige Marktpenetrationsrate.

Alle Interviewteilnehmer äußerten explizit den Bedarf an einer Anrechnung von Off-Cycle Effizienzpotenzialen. Jedoch führt der erwartete bürokratische Aufwand zur Anrechnung einer Ökoinnovation dazu, dass derzeit keines der befragten Unternehmen beabsichtigt, eine Ökoinnovation anzumelden. Der nötige Zertifizierungsaufwand und das Risiko, dass die Innovation nicht genehmigt wird, werden allgemein kritisiert. Darüber hinaus werden von den Interviewteilnehmern die 1 g CO₂/km Wirksamkeitsgrenze angesprochen, welche auf 0,5 g CO₂/km reduziert oder ganz entfallen sollte. Daneben ist die Definition des Innovationsgrades einer Maßnahme umstritten, da diese lediglich an einer Marktpenetrationsrate in einem Referenzjahr festgemacht wird. Von vielen Befragten wurde die Möglichkeit gesehen, auch Maßnahmenpakete zu definieren, die in Summe an 1 g CO₂/km herankommen würden, jedoch einzeln nur schwer messbar und nachweisbar sind.

Technologie: Technologische Hürden

Als technologische Herausforderungen werden derzeit die Technologien zur Elektrifizierung des Antriebstrangs gesehen. Die Schlüsselkomponente Batterie ist hinsichtlich der Parameter Gewicht, Größe, Sicherheit und Zyklenbeständigkeit sowie Alter zu optimieren. Diese Aspekte sind für alle befragten Unternehmen, bei denen die E-Mobilität ein zentraler Bestandteil der Langfriststrategie ist, von besonderer Wichtigkeit.

Abgesehen von der Elektrifizierung des Antriebstrangs werden eher wirtschaftliche Herausforderungen statt technologischer Hürden gesehen. Grundsätzlich bestehen Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Nachfrage insbesondere nach Elektrofahrzeugen, der konjunkturellen Lage mit den Auswirkungen auf die Volumen- und Premiummärkte und den derzeit noch vergleichsweise hohen Kosten der CO₂-Reduzierungsmaßnahmen.

Technologie: Zyklus- und Modellpläne

Die Zyklus- und Modellpläne sind Bestandteil der Langfristplanung eines jeden Fahrzeugherstellers. Die Interviewteilnehmer gaben an, dass grundsätzlich für den Planungshorizont 2020 ein ausreichender Zeitraum besteht, Innovationen im Einklang mit den Zyklus- und Modellplänen in die Fahrzeugflotte zu implementieren. Da jedoch saisonale Nachfrageschwankungen, wirtschaftliche Entscheidungen ein Produkt länger am Markt abzusetzen und weitere Unsicherheitsfaktoren die Modellpläne auch kurzfristig beeinflussen können, besteht ein Bedarf an Flexibilisierungsmaßnahmen für die Flottenzielwerte. Ein Banking-System könnte den Fahrzeugherstellern Handlungsspielräume schaffen.

EU-Verordnung: Grenzwertgeraden

Zur Definition des Grenzwertes für das Jahr 2020 sehen die befragten Fahrzeughersteller die Verschiebung der Grenzwertgeraden von 130 g auf 95 g bei gleicher Steigung (0,0457) als ambitioniert, aber zielführend an. Eine Drehung der Grenzwertgeraden (Steigung 0,0333 statt 0,0457) verteilt die Anstrengungen zwischen den Volumen- und Premiumherstellern neu, resultiert jedoch nicht in einer weiteren absoluten CO₂-Einsparung über der gesamten europäischen Fahrzeugflotte. Die Premiumhersteller, deren Fahrzeugflottenmasse überdurchschnittlich hoch ist, zeigten sich ablehnend gegenüber einer flacheren Kurve. Die meisten befragten Volumenhersteller, deren durchschnittliche Fahrzeugflottenmasse sehr nahe am Drehpunkt liegt, sprachen sich ebenfalls gegen eine Neuverteilung der Last aus, auch im Hinblick auf die Vereinfachung des Zielwertes für die anderen europäischen Wettbewerber.

EU-Verordnung: Parameterwahl

Die EU-Verordnung sieht die Option vor, zukünftig den Parameter Masse der CO₂-Gesetzgebung auf einen anderen Parameter, z.B. den Fahrzeugfootprint¹, der auch in den USA zum Einsatz kommt, zu ändern. Grundsätzlich wird von allen Interviewteilnehmern die Funk-

¹ Der Fahrzeugfootprint entspricht dem Produkt aus durchschnittlicher Spurweite und dem Radstand.

tion des Parameters als Differenzierungsmöglichkeit der Grenzwerte für Volumen- und Premiumhersteller betont. Dies ist grundsätzlich auch mit dem Footprint-Parameter möglich und würde tendenziell nur im Detail Änderungen an den spezifischen Zielen der Hersteller bedeuten.

Alle befragten Fahrzeughersteller sprechen sich insbesondere vor dem Hintergrund einer Kontinuität und Sicherheit in der Planung der Langfristziele bis 2020 für die Beibehaltung der massebasierten Zielwerte aus. Derzeit sind den Interviewpartnern keine signifikanten Vorteile einer Footprint basierten Gesetzgebung ersichtlich, die den Aufwand des Änderungsprozesses rechtfertigen würden.

EU-Verordnung: Flexibilisierungsmaßnahmen

Derzeit werden verschiedene Flexibilisierungsmaßnahmen der EU-Verordnung diskutiert, die das Ziel haben, Anreize für Niedrigemissionsfahrzeuge und Elektromobilität zu schaffen.

Alle befragten Fahrzeughersteller zeigen verstärktes Interesse an der Einführung eines Credit/Debit Systems zum Ausgleich von unterschiedlichen Modellzyklen sowie wirtschaftlichen Schwankungen nach amerikanischem Vorbild. Dabei sollte dieses System so formuliert werden, dass die frühzeitige Einführung von CO₂-Reduktionstechnologien belohnt wird.

Die Interviewpartner, welche insbesondere die Einführung der Elektromobilität forcieren, sprechen sich zudem für eine längerfristige Beibehaltung der Super-Credits für Elektrofahrzeuge ohne eine Limitierung der absoluten Anzahl in der Bilanz je Hersteller aus. Als mögliche Idee wurde formuliert die Super-Credits bis zur Erzielung eines nicht näher in der Höhe spezifizierten Gesamtmarktanteils anzurechnen.

6.5 Weitere Ergebnisse der Interviews

Im Interview mit den Industrievertretern wurde abschließend die Möglichkeit eingeräumt, sich über weitere Themen und die Zeit nach 2020 auszutauschen.

Im allgemeinen Teil wurde von mehreren Interviewteilnehmern noch einmal hervorgehoben, dass die zukünftige Gesetzgebung stets technologieneutral formuliert werden sollte. Abgesehen von der Elektromobilität sprachen sich die Befragten dafür aus, dass es allen Herstellern freigestellt sein sollte, jenen Weg selbst zu definieren, der die Ziele zur Reduzierung der CO₂-Emissionen erreicht. Hierbei muss stets berücksichtigt werden, dass sich aktuelle und zukünftige Vorschriften, z.B. in den Bereichen Sicherheit oder Abgasgesetzgebung, gegenläufig auf die Anstrengungen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen auswirken können.

In Bezug auf den Zeithorizont nach dem Jahr 2020 besteht bei allen Herstellern eine vergleichsweise hohe Unsicherheit, z.B. im Hinblick auf die wirtschaftliche Lage und die Marktpenetration der batterieelektrischen und Plug-In Elektrofahrzeuge, so dass man sich zum Zeitpunkt der Durchführung der Interviews nicht auf exakte Zielwerte verständigen wollte.

Grundsätzlich wurden jedoch zwei mögliche Weiterentwicklungen der CO₂-Gesetzgebung als Diskussionsvorschläge formuliert.

So könnte einerseits der Betrachtungsfokus der CO₂-Gesetzgebung erweitert werden. Derzeit wird ausschließlich die Nutzungsphase der Pkw anhand eines konstruierten Fahrzyklus bewertet. Eine Bilanzierung aller Fahrzeuge im Sinne einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment – LCA) würde Anreize zur Realisierung von Potenzialen durch Nutzung von nachhaltigen Rohstoffen in der Fahrzeugkonstruktion, einer effizienteren Produktion und einer optimierten Kraftstoffeffizienz über der gesamten Fahrleistung setzen.

Neben dem Betrachtungsfokus der Gesetzgebung auf die Nutzungsphase könnte auch die Möglichkeit eine hinsichtlich der Integration von Kleinstfahrzeugen in die Bilanzierung diskutiert werden. Derzeit betreiben mehrere Fahrzeughersteller Anstrengungen, ihre Fahrzeugmodellpalette nach unten zu erweitern und entwickeln Konzepte z.B. in der Fahrzeugklasse L7e (leichte vierrädrige Kraftfahrzeuge). Diese Konzepte sollen dem Kundennutzen von Kleinstwagen nahekommen und werden häufig mit einem batterieelektrischen Antriebstrang ausgestattet. Somit liegt es nahe diese in einer Bilanzierung ebenfalls zu berücksichtigen.

6.6 Zwischenfazit

Im Rahmen der geführten Experteninterviews konnten die bislang ermittelten Zwischenergebnisse verifiziert werden, wobei die Expertenmeinungen eine breite Streuung aufweisen. Im Anschluss an den Informationsaustausch mit den befragten Fahrzeug- und Systemherstellern wurden die Kernergebnisse anonymisiert und zusammengefasst.

Die befragten Unternehmen beurteilten zunächst im Rahmen der Technologiebewertung die Technologiepakete selbst sowie die Gesamthöhe der CO₂-Einsparpotentiale. Dabei wurden von den Interviewteilnehmern einzelne Technologien in ihrer Wirksamkeit und gegenseitigen Beeinflussung teilweise unterschiedlich eingeschätzt. Es konnte festgestellt werden, dass jeder Interviewpartner eine unternehmensspezifische Technologiestrategie verfolgt, die sich nach der individuellen Ausgangsposition und den Unternehmensstärken ausrichtet. Die festgelegten Zeithorizonte zur Serieneinführung bzw. Verfügbarkeit der Technologiepakete wurden durch die Interviewpartner als realistisch eingeschätzt. Die unternehmensseitigen Einschätzungen hinsichtlich der Herstellkosten sind sehr breit gestreut. Die Herstellkosten des TP1 wurden leicht geringer bzw. leicht höher bewertet, wohingegen die Kosten der Technologiepakete TP2K und TP3K als nahezu gleich bzw. leicht erhöht abgeschätzt wurden. Alle befragten Fahrzeughersteller gaben signifikant höhere Kosten für Hybridantriebe an.

In Bezug auf die zukünftige Marktverteilung der Fahrzeugsegmente im Jahr 2020 weicht der Durchschnitt der Interviewantworten nur gering vom Stand im Jahr 2010 ab. Eine große Unsicherheit zeigt sich auf der Ebene der zugehörigen Antriebstrangkonzepte. Diese Varianz basiert auf einer Vielzahl an unterschiedlichen und zum Teil sogar gegenläufigen Prognosen. Die größte Ungewissheit wird von allen Interviewteilnehmern im Markterfolg der reinen Elektrofahrzeuge gesehen.

Die befragten Fahrzeughersteller sehen derzeit im Planungshorizont 2020 keinen Anlass, die Lasten zwischen Volumen- und Premiumherstellern neu zu verteilen, so dass der 95 g Zielwert bei gleicher Steigung festgesetzt werden sollte.

Dieser Zielwert sollte nach Ansicht der Interviewteilnehmer von einigen Flexibilisierungsmaßnahmen begleitet werden, um Anreize zu setzen, Niedrigemissionsfahrzeuge und Elektrofahrzeuge schon früh im Markt zu etablieren. Als wichtigstes Flexibilisierungselement wurde häufig ein Credit-/Debit-System genannt, welches die frühzeitige Einführung von CO₂-sparenden Technologien fördert. Darüber hinaus sollten Super Credits für Elektrofahrzeuge länger als aktuell geplant anrechenbar sein.

Auf Basis der Ergebnisse der durchgeführten Experteninterviews werden die ermittelten Technologiepakete mit den zugehörigen Gesamteinsparpotenzialen und Gesamtherstellkosten für die nachfolgenden Berechnungen beibehalten. Die von den Interviewteilnehmern angegebenen höheren Kosten zur Darstellung der Hybrid-Technologie in einem Premiumfahrzeug fließen im Folgenden in die strategischen Implikationen für die deutsche Automobilindustrie ein (AP5).

7 Ableitung von CO₂-Zielwerten (AP5.1)

Im fünften Arbeitspunkt werden in einem ersten Schritt technisch und wirtschaftlich vertretbare CO₂-Flottenwerte und damit korrespondierende Zielwerte abgeleitet werden (AP5.1). Hierzu werden die vorher erarbeiteten Zwischenergebnisse herangezogen und in eine Modellierung des gesamten EU-Marktes integriert. Hierauf aufbauend werden im nächsten Kapitel die Implikationen für die deutsche Automobilindustrie abgeleitet und mögliche Handlungsfelder für alle Akteure diskutiert (AP5.2).

7.1 Methodische Vorgehensweise und Szenarienentwicklung

Zur Ableitung der CO₂-Flottenwerte wird eine auf Szenarien basierende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den europäischen Neuzulassungsmarkt entwickelt. Hierzu werden zunächst die wesentlichen Einflussparameter für die Wirtschaftlichkeitsanalyse identifiziert und anschließend quantifiziert. Hierauf aufbauend erfolgt die Modellierung des europäischen Pkw-Neufahrzeugmarktes im Jahr 2020. Dabei werden gewerbliche Kunden sowie private Kunden berücksichtigt, die sich z.B. hinsichtlich der Jahreslaufleistung und der Entscheidungshorizonte unterschieden. Nach der einzelnen Modellierung der Parameter werden die beiden Kundengruppen zur Abbildung des gesamten europäischen Marktes zusammengeführt und die CO₂-Flottenwerte für die EU-Neuzulassungen ermittelt. Abschließend erfolgt eine Variation der Rahmenbedingungen für die Szenarien und eine entsprechende Sensitivitätsanalyse der Einflussparameter. Abb. 7-1 visualisiert die Methodik der Ableitung der CO₂-Flottenwerte.



Abb. 7-1: Methodische Vorgehensweise im AP5

Für die Szenarioanalyse werden im Folgenden drei mögliche Entwicklungspfade vorgestellt, welche die Grenzen der möglichen Szenarien sowie die erwartete realistische Entwicklung widerspiegeln.

Im realistischen Szenario wird davon ausgegangen, dass sich die Kraftstoffpreise mit der gleichen Steigerungsrate wie in den letzten Jahren weiterentwickeln. Somit verändert sich auch die Marktzusammensetzung der Antriebstrangkonzepte im Jahr 2020 gegenüber 2010. Dementsprechend werden elektrifizierte Fahrzeugkonzepte, wie BEV und PHEV, einen geringen Anteil im Markt erzielen. Die bereits eingeführten prognostizierten Herstellungskosten bei Massenproduktion (vgl. AP2) werden in diesem Szenario erreicht.

Im konservativen Szenario wird von niedrigeren Kraftstoffpreisen in 2020 im Vergleich zum realistischen Szenario ausgegangen. Dies führt dazu, dass die Nachfrage bezüglich kraftstoffsparender Technologien reduziert wird und sich die Marktverteilung gegenüber 2010 nicht ändert. Somit wird keine signifikante Anzahl an elektrifizierten Fahrzeugkonzepten im Markt eingeführt. Durch die niedrigere Nachfrage an innovativen Technologien werden die prognostizierten Herstellungskosten höher als im realistischen Szenario ausfallen, da weniger Skaleneffekte erzielt werden und die Entwicklungsaufwände auf eine geringere Stückzahl umgelegt werden müssen.

Im progressiven Szenario werden höhere Kraftstoffpreise für den Endkunden als im realistischen Szenario erwartet. Dies stützt die Annahme, dass sich die prognostizierte Marktverteilung für das Jahr 2020 einstellt. Die hohen Kraftstoffpreise würden eine erhöhte Nachfrage an kraftstoffsparenden Technologien auslösen, wodurch zusätzliche Skaleneffekte erschlossen würden und die Entwicklungsaufwände auf eine höhere Stückzahl umgelegt werden könnten. Somit könnten die Endkundenpreise der Technologien gesenkt werden.

Die folgende Abb. 7-2 fasst die wesentlichen Annahmen der drei Szenarien zusammen.

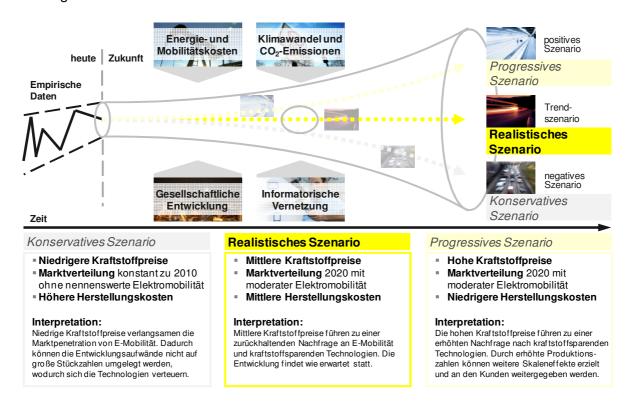


Abb. 7-2: Szenarioüberblick

7.2 Einflussparameteranalyse für Wirtschaftlichkeitsanalyse (TCO)

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird durch die Anschaffungskosten und die laufenden Kosten über der Nutzungsphase im Sinne einer "Total Cost of Ownership" - Betrachtung definiert. Als wesentliche Parameter mit Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden daher im Folgenden, abgesehen von der Kraftstoffeffizienz der Technologien, die Endkundenlistenpreise der Technologien, die Energiepreise für Benzin und Diesel in der Europäischen Union, sowie die Fahrzeuglaufleistung, die Fahrzeughaltedauer und der Kalkulationszinssatz für Investitionsrechnungen einzeln abgeschätzt und vorgestellt.

7.2.1 Endkundenpreis der Technologien

Der Endkundenpreis der Technologien definiert die Initialkosten der Fahrzeuganschaffung. Dabei wird der Endkundenpreis von privaten Kunden neben der Fahrzeuggröße und Sicherheit an dritter Stelle der Entscheidungskriterien beim Fahrzeugkauf genannt [PET06]. In der vorliegenden Studie wurden ausführlich die Herstellungskosten der Technologien eingeführt und diskutiert, vgl. AP2. Diese Herstellungskosten entsprechen jedoch nicht dem Marktpreis der entsprechenden Technologie, was eine differenzierte Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Herstellungskosten und Marktpreis erforderlich macht.

Allgemein orientiert sich der Marktpreis einer neu eingeführten Technologie an der erwarteten Zahlungsbereitschaft der Kundenzielgruppe. Dieser Preis kann anfangs sogar unter den Herstellungskosten liegen, sodass der Hersteller zunächst einen negativen Deckungsbeitrag erwirtschaftet (vgl. Abb. 7-3, Bereich 1). Mit steigender Ausbringungsmenge sinken die Herstellungskosten infolge von Lern- und Skaleneffekten, wodurch der Break-Even-Punkt erreicht werden kann, d.h. die Herstellungskosten entsprechen dem Verkaufspreis vor Steuern. Bei weiter rückläufigen Produktionskosten mit zunehmender Produktionsmenge wird in der Folge ein positiver Deckungsbeitrag erzielt (Bereich 2). Nach der Deckung der negativen Erträge durch die Markteinführung können der Marktpreis angepasst und die generierten Lern- und Skaleneffekte teilweise an den Endkunden weitergegeben werden (Bereich 3). Im Fall der Massenproduktion sind die Lerneffekte nach Überschreitung eines Zeitpunkts erschöpft, so dass die Herstellungskosten ein über der Ausbringungsmenge annähernd konstantes Niveau annehmen (Bereich 4). Im Rahmen dieser Studie wird ausschließlich der Bereich 4 fokussiert, innerhalb dessen sich die Herstellungskosten der Technologien näherungsweise konstant verhalten.

Die Differenz zwischen den Herstellungskosten und dem Marktpreis einer Technologie ergibt sich aus der erzielten Marge der Fahrzeughersteller und -händler und dem länderspezifischen Mehrwertsteuersatz, der in der EU durchschnittlich 20,20 % beträgt. Für die Differenz zwischen dem Endkundenlistenpreis und den Herstellungskosten wird ein möglicher Aufschlag zwischen 0 und 100 % betrachtet. Die Höhe der Margen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst und kann auch infolge strategischer Überlegungen des jeweiligen Herstellers mit der Zeit variieren.

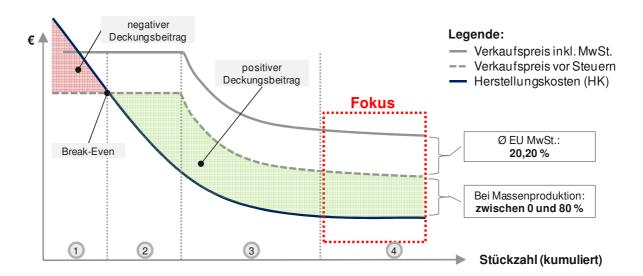


Abb. 7-3: Zusammensetzung des Marktpreises [in Anlehnung an [MOC10]]

Der Endkundenpreis eines Gesamtfahrzeugs wird durch den Hersteller unter Berücksichtigung seiner Kosten und der angestrebten Margen für Hersteller und Händler festgelegt. Solche Preiszusammensetzungen stellen für die Fahrzeughersteller hochsensible Daten dar und werden in der Regel nicht veröffentlicht. Abb. 7-4 zeigt exemplarisch eine mögliche Preisstruktur für zwei Volumenfahrzeuge und ein Premiumfahrzeug. Die dargestellte prozentuale Preisstruktur lässt sich anteilig auf die einzelnen Systeme und Komponenten des Fahrzeugs übertragen. In den vorliegenden Beispielen besitzen die Herstellungskosten einen Anteil von ca. 50 bis 59 % am Endkundenpreis. Herstellermarge, Händlermarge und Mehrwertsteuer korrelieren dabei mit den Herstellungskosten. Die Vertriebskosten können fahrzeugspezifisch keine direkte Abhängigkeit von den Herstellungskosten aufweisen.

Im direkten Vergleich der unterschiedlichen Segmente wird deutlich, dass die Marge des Premiumherstellers in diesem Beispiel über der des Volumenherstellers liegt.

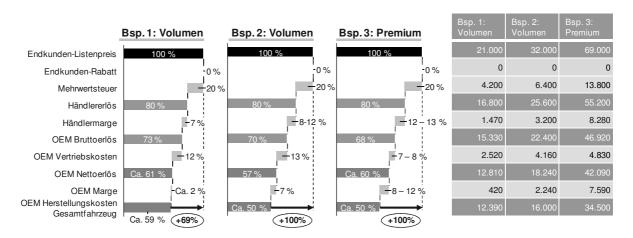


Abb. 7-4: Beispielhafte Gesamtfahrzeug-Preiszusammensetzung ausgewählter Volumenund Premiumhersteller, in Anlehnung an [MCK12; CUE99; HOL04]

Im nächsten Schritt soll die Preisstruktur des Gesamtfahrzeugs beispielhaft auf Technologieebene übertragen werden. Hierzu werden zwei Berechnungsbeispiele abgeschätzt, welche die Bandbreite der Preisgestaltung für etablierte Technologien und innovative Lösungen im Markt abdecken.

Für etablierte Technologien mit geringem Innovationsgrad kann in der Regel keine hohe Marge von Hersteller und Händler erzielt werden, da ein intensiver Wettbewerb am Markt besteht und die Zahlungsbereitschaft der Kunden reduziert ist. Daher wurden in diesem Beispiel untere Grenzwerte für Margen von Hersteller und Händler eingesetzt, die zusammen mit der anfallenden Mehrwertsteuer einen Aufschlag von ca. 40 % auf die Herstellungskosten ergeben.

Bei innovativen, wettbewerbsdifferenzierenden Technologien kann in der Regel eine höhere Marge am Markt durchgesetzt werden. Zeitgleich sind hierbei Vertriebskosten zur Bewerbung und Erläuterung einer Technologie anzusetzen. Insgesamt ergibt sich somit eine Abschätzung eines Aufschlags von ca. 80 % zwischen Herstellungskosten und Endkundenlistenpreis.

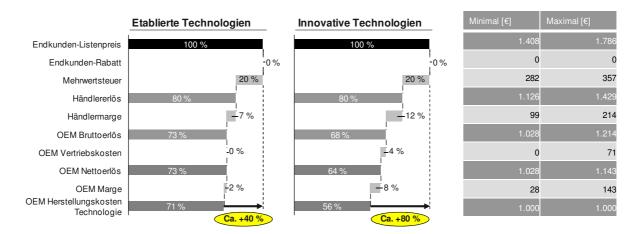


Abb. 7-5: Abschätzung der realistischen Differenz zwischen Herstellungskosten und Endkundenlistenpreis

Im Folgenden wird die Differenz zwischen Herstellungskosten und Endkundenlistenpreis als "ΔHK" abgekürzt und variabel zwischen 0 % und 100 % betrachtet. Je nach Szenario erfolgt eine entsprechende Interpretation des Endkundenlistenpreises.

Die EBIT-Margen der deutschen Fahrzeughersteller, also der prozentuale Anteil des operativen Ergebnisses am Umsatz, lagen im Jahr 2011 bei durchschnittlich 11,00 % im Premiumsegment (Audi: 12,1 % [AUD12b], BMW: 11,8 % [BMW12b], Mercedes-Benz: 9,0 % [DAI12]). Die EBIT-Margen der Volumenhersteller lagen mit 4,0 % (Volkswagen, [VOL12c]) oder 2,5 % (Toyota, [TOY12]) darunter. Diese Margen auf Gesamtunternehmensebene validieren die Größenordnung der Abschätzung zu den Herstellermargen auf Gesamtfahrzeugund Technologieebene. Grundsätzlich ist dabei zu berücksichtigen, dass in die EBIT Margen

auch viele weitere Unternehmensaktivitäten, wie die Ergebnisse der Hausbanken, internationale Handelsgeschäfte und Großinvestitionen, einfließen.

7.2.2 Entwicklung des Kraftstoffpreises in der Europäischen Union

Die laufenden Kosten eines Kraftfahrzeugs werden maßgeblich durch die Kraftstoffpreise für Benzin und Diesel definiert. Da im Folgenden die CO₂-Flottenemissionen für das Jahr 2020 abgeschätzt werden sollen, müssen die Kaufentscheidungen der verschiedenen Kunden in diesem Jahr analysiert werden. Daher ist eine Betrachtung der Kraftstoffpreise für den Zeitraum der Jahre 2020 bis 2030 erforderlich.

Zur Abschätzung der zukünftigen Kraftstoffpreise wurden die empirischen Daten der durchschnittlichen Kraftstoffpreise in der EU herangezogen und ausgewertet [ECE12]. Dabei wurde die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (Compound Annual Growth Rate – CAGR) über den letzten 7 Jahren mit ca. 4,7 % für Superbenzin und ca. 5,0 % für Diesel ermittelt. Diese CAGR wird im realistischen Szenario als konstant angenommen und startend mit dem Jahr 2012 bis zum Jahr 2030 fortgeschrieben.

Mit dieser Abschätzung wird ein Liter Superbenzin im Zeitraum zwischen 2020 und 2030 zwischen 2,38 €2020/I und 3,80 €2030/I kosten und ein Liter Diesel zwischen 2,25 €2020/I und 3,77 €2030/I. Die Entwicklung der durchschnittlichen realen Kraftstoffpreise wird in Abb. 7-6 zusammengefasst.

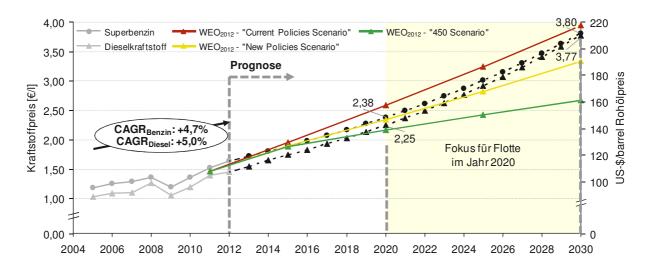


Abb. 7-6: Entwicklung der Kraftstoffpreise in der EU [ECE12] und der international gehandelten Rohölpreise [IEA12] [eigene Darstellung/Berechnungen]

Detaildaten: vgl. Abb. 13-37 im Anhang

Die internationale Energieagentur (International Energy Agency – IEA) hat in ihrem jährlich erscheinenden "World Energy Outlook 2012" [IEA12] die Entwicklung der Rohölpreise untersucht und drei mögliche Szenarien für die Energiepreisentwicklung aufgestellt. Ein Vergleich der jährlichen Steigerungsrate zwischen den Kraftstoffpreisen und den Rohölpreisen liefert

eine sehr enge Korrelation zu den IEA Szenarien "Current Policies" bzw. "New Policies". Berücksichtigt man zusätzlich den Fakt, dass auf die Rohölpreise eine nicht zu vernachlässigende Mineralölsteuer aufgeschlagen wird, ist die in Abb. 7-6 visualisierte Kraftstoffpreisentwicklung sogar als konservativ einzuschätzen.

Für das progressive Szenario wurde eine höhere Kraftstoffpreisentwicklung mit einer CAGR von 6,5 % für Benzin und Diesel angenommen. Somit würde ein Liter Benzin 2020 2,71 €₂₀₂₀/I und 2030 5,09 €₂₀₃₀/I sowie ein Liter Diesel 2020 2,39 €₂₀₂₀/I und 2030 4,49 €₂₀₃₀/I kosten.

Für das konservative Szenario wurden die Kraftstoffpreise in Anlehnung an die Studie "Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung" [SCL10], durchgeführt von Prognos AG, EWI und GWS im Jahr 2010, abgeschätzt. Hiernach würde ein Liter Benzin 2020 1,84 €₂₀₂₀/I und 2030 2,41 €₂₀₃₀/I sowie ein Liter Diesel 2020 1,78 €₂₀₂₀/I und 2030 2,35 €₂₀₃₀/I kosten.

Die Entwicklung der Rohölpreise und der Kraftstoffpreise ist retrospektiv sehr volatil geprägt. Beispielsweise können globale politische Ereignisse einen massiven Einfluss auf die tatsächliche Entwicklung der Preise nehmen. Der Einfluss der unterschiedlich abgeschätzten Kraftstoffpreisentwicklungen wird im Folgenden im Rahmen der Szenarioanalyse beschrieben.

7.2.3 Laufleistung von Fahrzeugflotten

Einen wichtigen Einflussparameter auf die Kaufentscheidung eines Pkw stellt der individuelle Mobilitätsbedarf dar. Dieser kann im Wesentlichen über die Jahreslaufleistung dargestellt werden, die beschreibt, wie viele Kilometer eine Person in einem Jahr zurücklegt.

Große Unterschiede in der jährlichen Laufleistung gibt es in den meisten europäischen Staaten zwischen diesel- und benzinbetriebenen Fahrzeugen. Dies liegt vornehmlich an der unterschiedlichen Akquisitions- und Betriebskostenstruktur. Dieselfahrzeuge werden in der Regel mit höheren jährlichen Abgaben besteuert. Jedoch liegen die Kraftstoffkosten je gefahrenem Kilometer durchschnittlich unterhalb von benzinbetriebenen Pkw. Daher eigenen sich dieselbetriebene Pkw insbesondere für Endkunden mit hoher jährlicher Fahrleistung, da die höheren Akquisitionskosten durch die niedrigeren Betriebskosten ausgeglichen werden können [KUN11]. Des Weiteren ergeben sich unabhängig von der Kraftstoffart unterschiedliche Jahreslaufleistungen zwischen den Fahrzeugsegmenten. Kleinere Fahrzeuge weisen tendenziell geringere Laufleistungen als Fahrzeuge der Mittelklasse oder Oberklasse auf.

In Abb. 7-7 werden die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen in der Europäischen Union dargestellt [FLE05]. Hierbei wird deutlich, dass sich die jeweiligen Laufleistungen landesspezifisch stark unterscheiden. Dies liegt an unterschiedlichen Steuern auf Kraftstoffe, geographischen Unterschieden und einem unterschiedlichen Urbanisierungsgrad mit entsprechend ausgebautem Verkehrssystem. Generell ist die Jahreslaufleistung aber immer vom individuellen Mobilitätsbedarf der Endkunden abhängig.

Da für die folgenden Berechnungen ein detaillierterer Aufschlüsselungsgrad der Laufleistungen erforderlich ist, wurde die Jahreslaufleistung für die unterschiedlichen Kundengruppen differenziert, vgl. Abb. 7-7. Private Endkunden fahren hiernach durchschnittlich zwischen 12.000 und 17.000 km im Jahr. Gewerbliche Kunden nutzen die Fahrzeuge mit Fahrleistungen zwischen 18.000 und 30.000 km pro Jahr deutlich intensiver. Hierbei ist stets die Fahrleistung mit dieselbetriebenen bzw. größeren Fahrzeugen entsprechend höher.

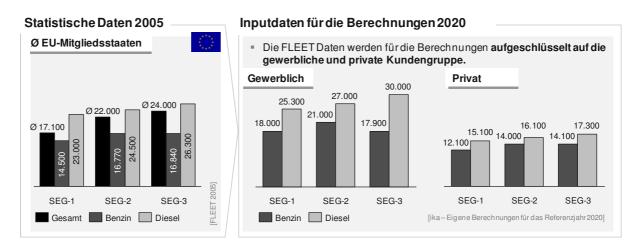


Abb. 7-7: Durchschnittliche Fahrzeuglaufleistungen [km/Jahr] in der EU [FLE05]

7.2.4 Fahrzeughaltedauer

Ein weiterer Einflussparameter auf die Kaufentscheidung und eine TCO-Berechnung für gewerbliche und private Kunden ist die durchschnittliche Fahrzeughaltedauer. In Abb. 7-8 werden verschiedene durchschnittliche Haltedauern von privaten und gewerblichen Fahrzeughaltern visualisiert. Insgesamt zeigt sich für die EU ein eher heterogenes Bild. So liegt in Frankreich die durchschnittliche Haltedauer eher niedrig bei ca. 5 Jahren. In Deutschland hingegen kommen verschiedene Studien zu Ergebnissen mit einer Bandbreite von 5 bis 7 Jahren, vgl. [MOC10][AWO12b][DKG07][DAT12].

Neben den landesspezifischen Unterschieden hängt die Haltedauer im Detail auch von weiteren Einflussfaktoren ab, z.B. dem Alter des Halters. In Deutschland halten die 18-29 Jährigen ihr Fahrzeug durchschnittlich 5,5 Jahre und die 30-39 Jährigen 6,5 Jahre [AWO12b]. Des Weiteren nutzen viele Firmenkunden ein Fahrzeug nur zwei Jahre.

Im Rahmen der nachfolgenden Analysen soll die Fahrzeughaltedauer als der Zeitrahmen betrachtet werden, in dem sich eine Investition aus Sicht des Fahrzeugkäufers refinanzieren soll. Dabei wird ebenfalls berücksichtigt, dass ein Kunde, der ein Fahrzeug nur einen kurzen Zeitraum nutzt und beispielsweise nach einem oder zwei Jahren verkauft, auch einen höheren Verkaufspreis auf dem Gebrauchtwagenmarkt erzielt, wenn er in Technologie investiert hat, die sich in diesem Zeitfenster refinanziert. Als Ergebnis der kurzen Analyse der Fahrzeughaltedauer kann für die Europäische Union von einer minimalen durchschnittlichen Hal-

tedauer von ca. 5 Jahren und von einer maximalen durchschnittlichen Haltedauer von 7 Jahren ausgegangen werden.

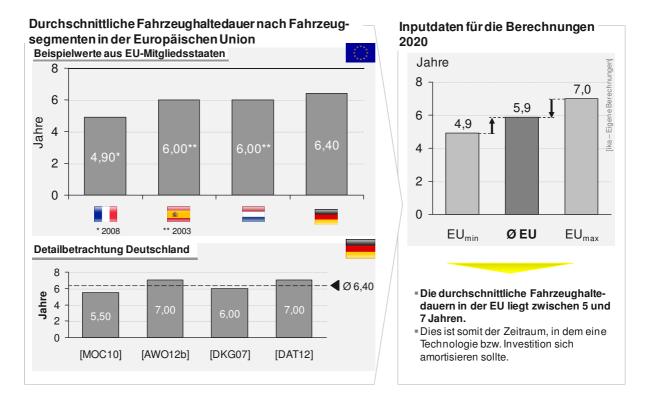


Abb. 7-8: Ø Fahrzeughaltedauer in der EU [MOC10][AWO12b][DKG07][DAT12]

7.2.5 Kapitalwertmethode

Bei der wirtschaftlichen Betrachtung kraftstoffsparender Technologien müssen neben den Anschaffungsmehrkosten die möglichen Einsparungen während der Nutzung berücksichtigt werden. Während bei gewerblichen Kunden diese Berechnungen im Sinne einer "Total Cost of Ownership"-Berechnung weit verbreitet sind und in der Regel präzise berechnet werden, werden solche Überlegungen von privaten Kunden bislang seltener angestellt und tendenziell überschlagsmäßig kalkuliert.

Die Kapitalwertmethode als Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung dient dazu, die Einsparungen in der Zukunft mit einen Zinssatz einer Alternativinvestition zu diskontieren. Als Ergebnis erhält man dabei den Kapitalwert einer Investition. Der Kapitalwert eignet sich dazu, verschiedene Investitionsalternativen miteinander zu vergleichen. Dabei wird die Tatsache berücksichtigt, dass frühe Ein- bzw. Auszahlungen höher bewertet werden als spätere Zahlungen. Demnach wird eine Einsparung in der Gegenwart, also zum Zeitpunkt der Anschaffung eines Fahrzeuges, vom Endkunden besser bewertet als eine spätere Einsparung in Form geringerer Kraftstoffkosten. Als Diskontierungsfaktor wird der von der Deutschen Bundesbank für Investitionsrechnungen vorgeschlagene Wert in Höhe von 8,00 % verwendet [DBB12]. Die folgenden Gleichungen Gl. 6-1 und Gl. 6-2 erläutern die Methodik zur Berechnung des Kapitalwertes.

Kapitalwert =
$$-X + \frac{e_1}{(1,08)^1} + \frac{e_2}{(1,08)^2} + \frac{e_3}{(1,08)^3} + \dots + \frac{e_n}{(1,08)^n}$$
 Gl. 6-1

mit

x = Ausgabe/Investition

e_n = Einsparung in Periode n

Im Folgenden soll eine kurze Beispielrechnung zeigen, wie der Kapitalwert einer Investition bei 200 € Technologiekosten und 100 € jährliche Kraftstoffminderkosten und einer Betrachtung von 2 Jahren kalkuliert wird.

Kapitalwert = -200 € +
$$\frac{100 €}{(1,08)^1}$$
 + $\frac{100 €}{(1,08)^2}$ = -200 € + 92,59 € + 85,73 € = -21,67 € Gl. 6-2

Ein negativer Kapitalwert bedeutet, dass sich die Technologie im Betrachtungszeitraum nicht refinanziert. Liegt der Kapitalwert genau auf null, so wird im Betrachtungszeitraum der Break-Even erreicht. Ein positiver Kapitalwert steht für eine wirtschaftlich sinnvolle Investition, da den anfänglichen Aufwänden höhere abdiskontierte Einsparungen gegenüberstehen.

Die nach diesem Verfahren berechneten Kapitalwerte erlauben einen Vergleich der Investitionsmöglichkeiten untereinander. Hierbei ist stets die Investitionsmöglichkeit mit dem maximalen positiven Kapitalwert zu bevorzugen.

7.3 Modellierung der Szenarien

Im Folgenden werden zur Ableitung von CO₂-Flottenwerte für das Jahr 2020 die gewerbliche und die private Kundengruppe beschrieben und anschließend das jeweilige Verhalten am Markt modelliert. Dazu wird unter Berücksichtigung der äußeren Rahmenbedingungen und der Verhaltensmuster dieser Kundengruppen für jedes der Technologiepakete eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt und anschließend die Marktdurchdringung abgeschätzt.

Anschließend erfolgt eine Synthese der beiden Kundengruppen zum europäischen Gesamtmarkt und somit eine Betrachtung der gesamten Entwicklung. Auf Basis der berechneten Kennwerte erfolgt die realistische Einschätzung von technisch und wirtschaftlich vertretbaren Zielwerten für das Jahr 2020.

7.3.1 Modellierung der gewerblichen Kunden

Im ersten Schritt erfolgt eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der kraftstoffsparenden Technologien durch die gewerblichen Kunden. Das Modell des gewerblichen Kunden soll dabei analog zum "Homo oeconomicus", dem nutzenmaximierenden, theoretischen Modell der Wirtschaftswissenschaften, entscheiden. Im Unterschied zum Kundenverhalten privater Fahrzeughalter handelt der "Homo oeconomicus" streng nach den Regeln der Gewinnmaximierung. Er repräsentiert einen Marktakteur, der absolut eigeninteressiert und rational agiert. Nach den Grundsätzen der Betriebswirtschaft sollte jedes Unternehmen und somit jeder gewerbliche Kunde nach dieser Maxime eine Gesamtbetriebskostenrechnung eines Pkw durchführen und anhand dieser seine Kaufentscheidung ausrichten.

Der Anteil gewerblicher Pkw Neuzulassungen am europäischen Gesamtmarkt entspricht ca. 51 %. Im SEG-3 liegt ein spezifischer Schwerpunkt mit ca. 80 %. In den gewerblichen Neuzulassungen dominiert der Dieselantrieb, nur im SEG-1 kommt der Benzinantrieb auf einen Anteil von 60 %. Die jährliche Fahrleistung liegt im Bereich zwischen 18.000 und 30.000 km und somit signifikant über den privaten Fahrzeughaltern. Abb. 7-9 fasst alle Modellierungsannahmen der gewerblichen Kundengruppe für das Jahr 2020 graphisch zusammen.

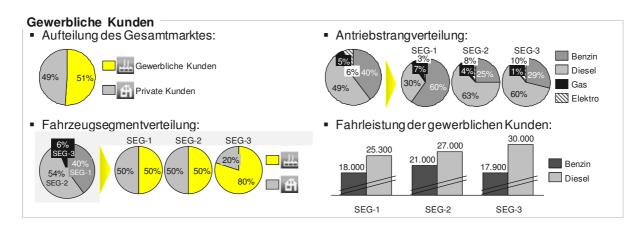


Abb. 7-9: Kennzahlen zur Modellierung der gewerblichen Kundengruppe im Jahr 2020

Im Folgenden wird die Methodik zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer kraftstoffsparenden Technologie beschrieben und anhand eines Beispiels erläutert. Die Berechnung für die gewerbliche Kundengruppe erfolgt analog zu einer klassischen Investitionskalkulation, bei der die verschiedenen Kapitalwerte von Investitionsoptionen verglichen werden und die Beste ausgewählt wird.

Im ersten Jahr der Investition erfolgt jeweils eine Ausgabe in Höhe der Anschaffungskosten eines Technologiepakets. In den Folgejahren verbraucht der Pkw bei gleicher Mobilität weniger Kraftstoff. In Abhängigkeit von Fahrzeugsegment, Fahrleistung, Kraftstoffart und dem jährlich angepassten Kraftstoffpreis erzielt der Endkunde somit eine Einsparung, die ihm als Einzahlung kontiert wird. Je später eine Einsparung erfolgt, desto stärker wird diese abgezinst, um den Zeitwert des Geldes zu berücksichtigen. In der folgenden Berechnung wurde die Dauer zur Refinanzierung der Investition variabel gehalten, so dass betrachtungszeitpunktabhängig verschiedene Szenarien abgeleitet werden können.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung soll anhand eines benzinbetriebenen Fahrzeugs aus dem SEG-1 exemplarisch diskutiert werden, vgl. Abb. 7-10. Grundsätzlich ist eine Investition nur dann sinnvoll, wenn ein positiver Kapitalwert erzielt wird. Daher lohnt sich die Einführung eines ersten Technologiepakets erst ab der Zeitperiode, in der ein Schnittpunkt mit der Achse erreicht wird. Bis dahin ist die Basisausstattung des Fahrzeugs, Stand der Technik im Jahr 2010, die wirtschaftlichste Alternative, vgl. Abb. 7-10 (Ziffer 1). Anschließend erfolgt eine Betrachtung der maximal möglichen Kapitalwerte je Betrachtungszeitraum. Für das hier betrachtete Beispielfahrzeug ist ab einer Haltedauer von 3 Jahren das TP1, ab einer Haltedauer von 5 Jahren das TP2K und ab einer Haltedauer von 8 Jahren das TP3K die rationals-

te Investitionsentscheidung. Je nachdem welche Technologie in diesem Verfahren ausgewählt wird, stellt sich der entsprechende CO₂-Flottenwert ein.

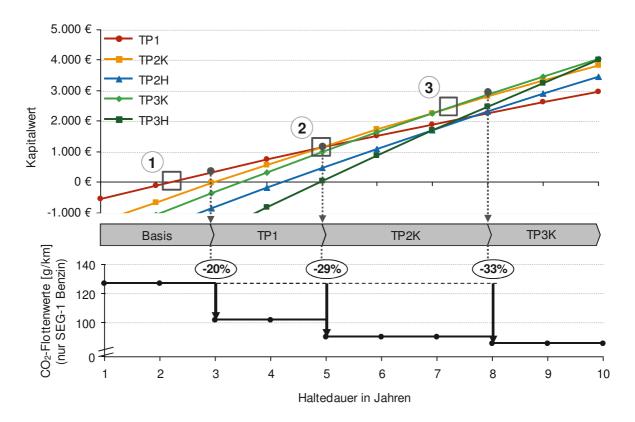


Abb. 7-10: Beispielhafte Methodik der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Das hier exemplarisch skizzierte Verfahren wird analog auf alle Antriebsvarianten und Fahrzeugsegmente angewandt und im Folgenden in der Flottenberechnung anteilig gewichtet zusammengeführt.

7.3.2 Modellierung der privaten Kunden

Im Gegensatz zum "Homo oeconomicus" handelt der private Kunde nicht immer rational. Die durch neue Technologien gegebenen Funktionen und Fahrerlebnisse im Pkw sind vielen Endkunden eine Mehrinvestition wert. Daher erfordert die Modellierung der privaten Kundengruppe einen komplexeren Ansatz.

Innerhalb der privaten Kundengruppe werden fünf Untergruppen definiert die unterschiedliche Mehrkosten akzeptieren. Der Einfluss der akzeptierten Mehrkosten auf die Berechnung wird im Folgenden erläutert. Der "Innovator" repräsentiert eine risikofreudige und finanziell starke Käuferschicht. Er akzeptiert die höchsten Mehrkosten von 20 %, macht allerdings nur 2,5 % der privaten Fahrzeughalter aus. Die "Early Adopters" sind bereit 14 % Mehrkosten zu tragen und repräsentieren 13,5 % der privaten Käufer. Anteilsmäßig repräsentieren die "Early Majority" und "Late Majority" mit je 34 % den größten Anteil der Käufer, akzeptieren 6 % bzw. 2 % Mehrkosten und stellen für volumenfokussierte Fahrzeughersteller die finanziell

wichtigsten Käufergruppen dar. Die Käufergruppe der "Laggards" handelt ähnlich wie der gewerbliche Kunde streng wirtschaftlich ausgerichtet und akzeptiert keinerlei Mehrkosten. Der Anteil dieser Gruppe beläuft sich auf 16 %, vgl. [ROG62][MOC10].

Die private Kundegruppe hat insgesamt einen Anteil von ca. 49 % an den Neuzulassungen und unterscheidet sich vom gewerblichen Kunden insbesondere durch eine deutlich geringere Fahrleistung von nur ca. 14.500 km pro Jahr. Abb. 7-9 fasst alle wichtigen Modellierungsannahmen der privaten Kundengruppe im Jahr 2020 graphisch zusammen.

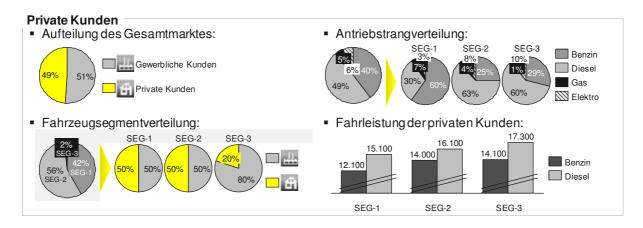


Abb. 7-11: Kennzahlen zur Modellierung der privaten Kundengruppe im Jahr 2020

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit erfolgt grundsätzlich analog zu der gewerblichen Wirtschaftlichkeitsanalyse, bezieht allerdings zusätzlich die akzeptierten Mehrkosten mit ein. Wie im Berechnungsmodell der gewerblichen Kundengruppe wird ein Kapitalwert für jede Kombination aus Segment, Kraftstoff, Haltedauer und Technologiepaket errechnet. Dieser setzt sich zusammen aus der Ausgabe in Höhe der Anschaffungskosten des Technologiepaketes zuzüglich der Summe aller Einsparungen der einzelnen Zeitperioden durch das jeweilige Technologiepaket. Zusätzlich werden die Einsparungen abhängig vom Zeitpunkt abgezinst, um den Zeitwert des Geldes zu berücksichtigen.

Im Unterschied zum Berechnungsmodell des gewerblichen Kunden wird nicht zwingend das Technologiepaket mit dem höchste Kapitalwert der jeweiligen Zeitperiode durch den Kunden gewählt, sondern im Rahmen der spezifischen Grenzen je Kundengruppe kann auch eine wirtschaftlich schlechtere Alternative bevorzugt werden. Diese Grenze errechnet sich aus dem höchsten Kapitalwert einer Zeitperiode abzüglich des prozentualen Anteils in Höhe der akzeptierten Mehrkosten. Das technologisch beste Paket innerhalb dieser Grenzen wird erworben.

Am Beispiel eines benzinbetriebenen Fahrzeugs aus dem SEG-1 und eines "Innovators" mit 20 % Mehrpreisbereitschaft soll die Vorgehensweise erläutert werden, vgl. Abb. 7-12. Für den privaten Halter kommt eine Investition erst ab einem positiven Kapitalwert in Betracht, so dass bis zu diesem Zeitpunkt die Basisausstattung gewählt wird, vgl. Abb. 7-12 (Ziffer 1). Anschließend wird der maximal mögliche Kapitalwert je Betrachtungszeitraum ermittelt, wo-

raufhin eine Abfrage erfolgt, ob der Kapitalwert je Betrachtungsperiode eines weiter entwickelten Technologiepaketes innerhalb der Spanne der Mehrkostenbereitschaft liegt. Im hier exemplarisch dargestellten Beispiel ist der Kapitalwert des TP1 zwar bis zur Zeitperiode 7 der maximal mögliche, doch liegt TP2K bereits nach Zeitperiode 6 innerhalb der Spanne der Mehrkostenbereitschaft, weshalb TP2K von dieser innovationsaffinen Kundengruppe eine Zeitperiode früher ausgewählt wird, vgl. Abb. 7-12 (Ziffer 2). Ähnlich verhält es sich mich dem Kapitalwert des TP3K, welcher selbst in Periode 10 den des TP2K nicht überschreitet, aber bereits ab Periode 8 von der technologieaffinen Kundengruppe ausgewählt wird, vgl. Abb. 7-12 (Ziffer 3). Entsprechend der gewählten Technologien wird der CO₂-Flottenwert reduziert.

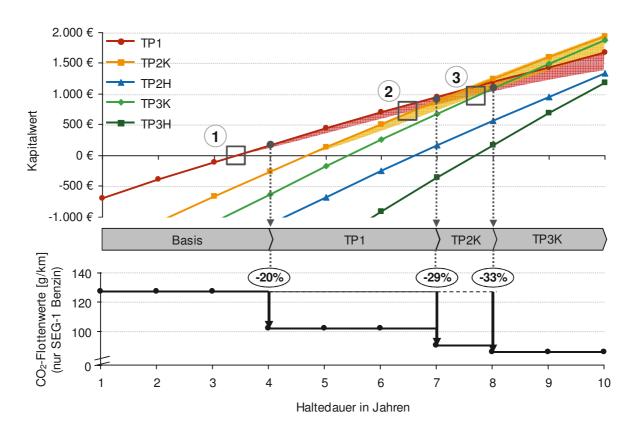


Abb. 7-12: Methodik der Wirtschaftlichkeitsberechnung im Privatkunden-Szenario

7.3.3 Zwischenergebnisse der Marktmodellierung

Aufbauend auf der im vorherigen Kapitel exemplarisch erläuterten Modellierung der einzelnen Kaufentscheidung werden die Berechnungen analog für jede Kundengruppe und jedes Referenzfahrzeug durchgeführt.

Als Ergebnis erhält man eine Kurvenschaar für verschiedene Aufpreisszenarien zwischen Endkundenlistenpreis und Herstellungskosten über dem Refinanzierungszeitraum. Die Zwischenergebnisse spiegeln das Ergebnis aus ca. 2.160 einzelnen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wieder, die entsprechend gewichtet zum Gesamtergebnis zusammengesetzt werden.

Die folgende Abb. 7-13 visualisiert das Zwischenergebnis aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der gewerblichen und privaten Kunden, die jeweils ca. 50 % der Neuzulassungen ausmachen. Es ist deutlich erkennbar, dass die gewerblichen Kunden mit der vergleichsweise hohen Fahrleistung zu wesentlich effizienteren Technologien tendieren, was an den niedrigeren erreichbaren CO₂-Werten ablesbar ist. Private Kunden haben gemäß den Szenarioannahmen eine niedrigere Fahrleistung, was sich darin niederschlägt, dass sich teure kraftstoffsparende Technologien für die Endkunden nicht refinanzieren würden und die private Flotte sich aus weniger kraftstoffsparenden Fahrzeugen aber für die Kundengruppe finanziell günstigeren Pkw zusammensetzt.

Es ist erforderlich, die Zwischenergebnisse der beiden Kundengruppen zusammenzuführen und mit den CO₂-Zielwerten für die gesamten EU-Neuzulassungen in 2020 darzustellen.

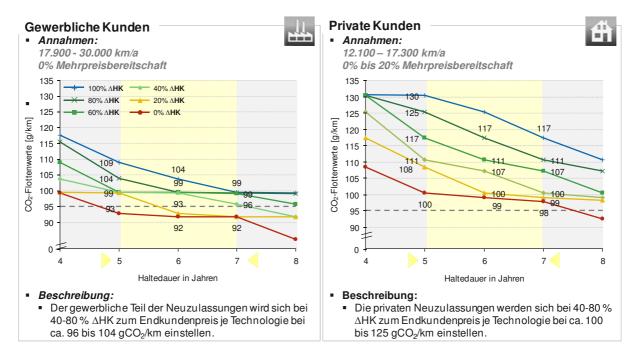


Abb. 7-13: Zwischenergebnisse der Betrachtung der einzelnen Marktakteursgruppen

7.4 CO₂-Flottenemissionen und CO₂-Zielwerte der EU-Neuzulassungen

Der Markt der EU-Neuzulassungen setzt sich aus gewerblichen und privaten Neuzulassungen zusammen. Die folgende Kurvenschaar in Abb. 7-14 visualisiert die sich einstellenden CO₂-Flottenwerte bei einer Variation des Differenz zwischen Endkundenlistenpreisen und Herstellungskosten (ΔHK) für kraftstoffsparende Technologien sowie unterschiedlichen Refinanzierungszeiträumen.

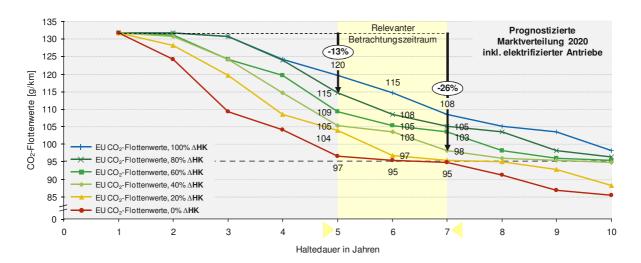


Abb. 7-14: CO₂-Flottenemissionen der gesamten EU-Neuzulassungen im Jahr 2020 bei Betrachtung verschiedener ΔHK und Refinanzierungszeiträume.

Die rote und niedrigste Kurve visualisiert die ausschließliche Weitergabe der Herstellungskosten an die Endkunden. Somit würde jeder Hersteller Verlust mindestens in Höhe der Mehrwertsteuer erzielen. In diesem Fall wären die Technologien so günstig, dass die durchschnittlichen CO₂-Flottenemissionen im Betrachtungszeitraum von 2010 bis 2020 auf minimal 95 g CO₂/km reduziert würden.

Im realistischen Szenario ist von einem Delta zwischen den Herstellungskosten und dem Endkundenlistenpreis für Technologien von mindestens 40 bis 80 % (inkl. MwSt.) auszugehen, vgl. Kapitel 7.2.1. Hier würden CO_2 -Flottenemissionswerte von 98 g CO_2 /km (-26 %) bis 115 g CO_2 /km (-13 %) erreicht, vgl. grüne Kurven in der Abbildung. Das Ziel von 95 g CO_2 /km wird mit oder ohne Massenanpassung des Grenzwertes in diesem Szenario nicht erreicht. Damit das Ziel erreicht werden könnte, müsste die Lücke von 3 bis 20 g CO_2 /km, z.B. durch den Einsatz von Ökoinnovationen oder weiteren Flexibilisierungsmaßnahmen, geschlossen werden.

Bei verordneter Zielerreichung muss die Lücke in Höhe von 8 bis 13 g CO₂/km (6 Jahre) geschlossen werden. Würden alle technischen Maßnahmen vor dem Hintergrund der besten Kosten-/Nutzeneffizienz genutzt werden, so wäre der Zielwert von 95 g CO₂/km für ca. 2.000 € zusätzliche Herstellungskosten erreichbar. Die europäische Automobilindustrie würde die durchschnittlichen zusätzlichen Kosten zur kosteneffizientesten Zielerreichung in Höhe von ca. 650 € bis 950 € (Herstellungskostenniveau) je Fahrzeug selbst tragen müssen. Dabei würden die Aufwände für Fahrzeughersteller mit einem Produktportfolio mit größeren Fahrzeugen nach oben vom Durchschnitt abweichen.

In den vergangenen zehn Jahren wurden jährlich durchschnittlich 3,4 g CO₂/km eingespart. Die prognostizierten 98 g CO₂/km würden davon ausgehen, dass diese Effizienzverbesserungsrate gehalten werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Aufwand zur Erzielung dieser Effizienzverbesserungsrate wie gezeigt steigt und nicht konstant bleibt.

Neben der Betrachtung des absoluten CO₂-Flottenemissionswertes ist stets die Korrelation zur Fahrzeugmasse von Bedeutung. Die technologischen Maßnahmen, die zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbauchs führen, werden ebenfalls das durchschnittliche Fahrzeugflottengewicht signifikant reduzieren.

Die folgende Abb. 7-15 verdeutlicht den Bedarf, dass die Referenzmasse in der CO_2 -Gesetzgebung regelmäßig angepasst wird, da sich ansonsten der Abstand zum spezifischen Zielwert signifikant erhöht. Im realistischen Szenario mit Δ HK= 40 bis 80 % wären dies bis zu 3,3 g CO_2 /km.

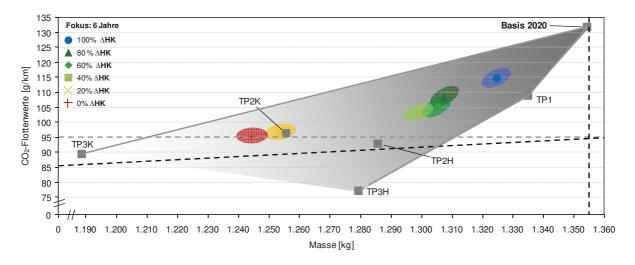


Abb. 7-15: CO₂-Flottenemissionen über Flottengewicht mit a₁=0,0457, M₀=1.372 kg

7.5 Szenarioanalyse

Neben dem bislang diskutierten realistischen Szenario ist es möglich, dass sich wichtige Rahmenparameter anders als derzeit erwartet entwickeln. In der folgenden Szenarioanalyse soll der Einfluss des Kraftstoffpreises, der unterschiedlichen Marktverteilung und der Herstellungskosten analysiert werden.

Im konservativen Szenario wird von einer niedrigeren Kraftstoffpreisentwicklung mit einer CAGR von ca. 2,7 % ausgegangen. Gleichzeitig verändert sich die Marktzusammensetzung für das Jahr 2020 gegenüber dem Jahr 2010 nicht. Somit würde keine nennenswerte Anzahl an elektrifizierten Fahrzeugkonzepten im Jahr 2020 zugelassen werden. Gleichzeitig müsste davon ausgegangen werden, dass sich einige der Technologien verteuern, da die geplanten Stückzahlen am Markt nicht realisiert werden können. Somit muss der Fokus auf die Kurvenschaar mit Δ HK = 40 bis 100 % gelegt werden. Insgesamt kann im konservativen Szenario lediglich ein CO_2 -Flottenwert von 132 bis 111 g CO_2 /km erzielt werden. Dementsprechend ist nicht davon auszugehen, dass die verbleibende Lücke zu 95 g CO_2 /km mit Ökoinnovationen oder weiteren Flexibilisierungsmaßnahmen geschlossen werden könnte.

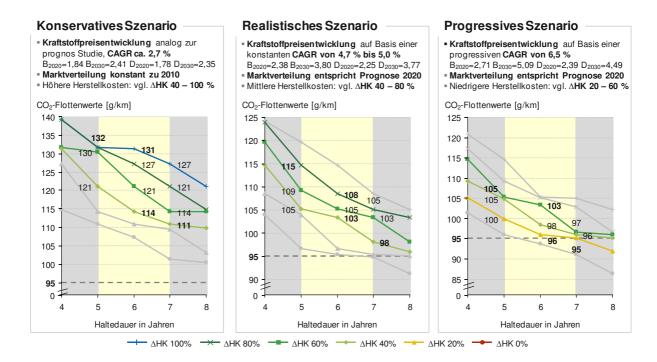


Abb. 7-16: Szenarioanalyse der CO₂-Flottenwerte

Im progressiven Szenario wird im Kern von einer deutlich stärkeren Kraftstoffpreissteigerung mit einer CAGR von ca. 6,5 % ausgegangen. Die hohen Kraftstoffkosten stehen im Einklang mit der für das Jahr 2020 prognostizierten Marktverteilung inklusive einem Anteil an BEV und PHEV von ca. 6 % an den Gesamtneuzulassungen. Die hohen Kraftstoffpreise würden die Nachfrage nach kraftstoffsparenden Technologien über die Erwartungen im realistischen Szenario hinaus erhöhen, so dass zusätzliche Lern- und Skaleneffekte generiert und an den Kunden weitergegeben werden können. Daher soll hier der Fokus auf die Kurvenschaar mit Δ HK = 20 bis 60 % gelegt werden. In diesem Szenario ist die Einhaltung der CO_2 -Flottengrenzwerte bei Anpassung der Fahrzeugbezugsmasse möglich. Die Flottenwerte würden sich im Rahmen zwischen 95 und 105 g CO_2 /km einstellen, so dass die verbleibende Lücke mit Ökoinnovationen und Flexibilisierungsmaßnahmen geschlossen werden könnte.

Die Szenarioanalyse belegt die Herausforderung, welche im 95 g CO₂/km Zielwert für die europäische Automobilindustrie formuliert wird. Nur im progressiven Szenario wird der CO₂-Zielwert der Neuzulassungen eingehalten. Hierbei ist in jedem Falle eine Anpassung der Referenzmasse unumgänglich, da diese die Zielwerte andernfalls zusätzlich intensivieren würde.

Im konservativen Szenario würden die gewerblichen und privaten Kunden im Durchschnitt nur in ca. 1.200 € teurere Technologien investieren, gegenüber 1.900 € im realistischen Szenario. Im progressiven Szenario hingegen sind die Kunden bereit, durchschnittlich ca. 2.250 € teurere Fahrzeuge zu kaufen, da sie deutlich höhere Einsparungen über der Zeit generieren können.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse der Szenarioanalyse ist, dass ein hoher Handlungsbedarf besteht, neben dem Angebot im Markt die Nachfrage nach kraftstoffsparenden Fahrzeugen zu entwickeln. Dabei müssen die gewerblichen und privaten Kunden mit einbezogen werden.

7.6 Sensitivitätsanalyse

Das hier vorgestellte Berechnungsmodell basiert auf einer Reihe von Annahmen und Prognosen für das Jahr 2020. Diese wurden im Einzelnen erläutert und detailliert hergeleitet. Mit der folgenden Abb. 7-17 wird der Einfluss der einzelnen Faktoren auf den CO₂-Flottenwert qualitativ bewertet.

Bereich	Faktor	Veränderung	CO ₂ -Flottenwert	Effekt
Technologie	Kosten der Technologien	Steigt	•	++
	Effizienz der Technologien	Steigt	0	++
	Ökoinnovationen	Einführung	0	++
Kosten	Kraftstoffpreisentwicklung	Steigt	O	++
	Strompreisentwicklung	Steigt	O	0
Mobilitäts- entwicklung	Fahrleistung	Sinkt	O	0
	Carsharing [Führt zur Auswahl intensiv genutzter effizienter Pkw]	Einführung	0	0
Marktentwicklung / Marktparameter	Anteil Diesel vs. Benziner	Steigt	0	+
	Anteil Elektrofahrzeuge (PHEV & BEV)	Steigt	0	+
	Anteil SEG-1 zu SEG-2 [Stärkere Nachfrage an kleineren Fahrzeugen]	Steigt	•	+
	Kundenverhalten	Veränderung	O / O	0
	Akzeptierte Mehrkosten	Niedriger	O	+
Steuersysteme	Steuersysteme in der EU	Berücksichtigung	2 / 2	-
	Steuervorteile für Firmen [i.S. der Berücksichtigung von Abschreibungen]	Berücksichtigung	8	-

Abb. 7-17: Sensitivität verschiedener Einflussfaktoren auf das Berechnungsmodell Legende: ++ sehr hoher Einfluss; o mittlerer Einfluss; -- sehr niedriger Einfluss

Im Rahmen der vorgestellten Szenarien sind die erwarteten Extrementwicklungen durch das konservative und progressive Szenario mit der entsprechenden Faktorkombination dargestellt und quantifiziert worden.

7.7 Zwischenfazit

Im Rahmen der Ableitung der CO₂-Zielwerte in Abhängigkeit der Technologiepakete wurde ein Gesamtkostenmodell entwickelt, welches die Marktpenetration von kraftstoffsparenden Technologien in Abhängigkeit der wichtigsten Rahmenparameter abschätzt. Hierbei werden dem Kunden alle Technologiekombinationen von der Basiskonfiguration bis zum stark optimierten Hybridfahrzeug angeboten, so dass dieser aus allen Optionen frei wählen kann.

Zur Abbildung verschiedener Entwicklungen der Einflussparameter wurden im Rahmen einer Szenarioanalyse drei unterschiedliche Entwicklungspfade skizziert. Die Entwicklung der aktuellen Trends wurde im realistischen Szenario zusammengeführt. Die beiden extremen Fak-

torkombinationen wurden in einem konservativen und einem progressiven Szenario abgebildet.

Im realistischen Szenario kann der Zielwert von 95 g CO₂/km bei 1.372 kg Referenzmasse von der gesamten EU-Fahrzeugflotte unter Berücksichtigung der erwarteten Marktentwicklung nur sehr schwer eingehalten werden. Bei Berücksichtigung eines Unterschieds zwischen Endkundenlistenpreis und den Herstellungskosten von ca. 40 bis 80 % resultiert ein Abstand von ca. 8 bis 13 g CO₂/km zum spezifischen Zielwert. Damit ist der Abstand in einer Größenordnung, so dass er z.B. durch Ökoinnovationen oder durch Flexibilisierungsmaßnahmen reduziert werden kann. Bei der Berechnung des Abstands wurde auch die Referenzmasse M stets angepasst. Sollte diese nicht kontinuierlich angepasst werden, erhöht sich der Abstand weiter. Die Technologiekombinationen im realistischen Szenario resultieren für die privaten und gewerblichen Endkunden im Durchschnitt in ca. 1.900 € zusätzlichen Anschaffungskosten.

In den vergangenen zehn Jahren wurden jährlich durchschnittlich 3,4 g CO₂/km eingespart. Die Prognose im realistischen Szenario würde davon ausgehen, dass diese Effizienzverbesserungsrate gehalten werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Aufwand zur Erzielung dieser Effizienzverbesserungsrate wie gezeigt steigt und nicht konstant bleibt.

Im konservativen Szenario wird der 95 g CO₂/km Zielwert verfehlt. Maßgeblich hierfür sind die nicht nennenswerte Elektrifizierung der Flotte, die niedrigen Kraftstoffpreise und die daraus resultierenden höheren Kosten für kraftstoffsparende Technologien. Der Abstand von ca. 16 bis 37 g CO₂/km ist nicht durch zusätzliche Maßnahmen auszugleichen und würde in hohen Strafzahlungen für die meisten Fahrzeughersteller resultieren. Im konservativen Szenario werden die gewerblichen und privaten Kunden im Durchschnitt nur in ca. 1.200 € teurere Technologien investieren.

Im progressiven Szenario wird die Einhaltung des 95 g CO₂/km Zielwertes als möglich erachtet. Die erwartete Marktverteilung für das Jahr 2020 reduziert die Ausgangsbasis für die Berechnungen. Durch die hohen Kraftstoffpreise und niedrigeren Herstellungskosten würden viele Technologien innerhalb des Betrachtungszeitraums wirtschaftlich werden. Der Abstand zu den Zielwerten der Gesamtflotte würde max. 8 g CO₂/km betragen. Im progressiven Szenario sind die Kunden bereit, durchschnittlich ca. 2.250 € mehr für Fahrzeuge zu investieren, da sie deutlich höhere Einsparungen über der Zeit generieren können.

Die Ergebnisse der CO₂-Flottenzielbetrachtung hängen maßgeblich von einigen wenigen Faktoren ab. Die Kosten und der Nutzen der Technologien definieren die Kosteneffizienz und den Erfolg der Maßnahmen am Markt. Darüber hinaus müssen die Technologiekosten in einem angepassten Verhältnis zu den Energiekosten für Benzin, Diesel, Gas und Elektrizität stehen, damit sie sich im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Markt durchsetzen können. Als letzter wichtiger Einflussfaktor ist die Entwicklung der Markt- und Gesamtwirtschaft zu nennen. Diese legt fest, wie sich die Flotte im Jahr 2020 zusammensetzen wird

und welche finanziellen Möglichkeiten die privaten und gewerblichen Kunden haben, in ökologische Technologien zu investieren.

Die wirtschaftliche Analyse der CO₂-Flottenwerte zeigt, dass es zukünftig eine Hauptherausforderung sein wird, den Markt der Pkw-Neuzulassungen in Richtung von kraftstoffsparenden und hocheffizienten Pkw zu entwickeln. Neben der Schaffung einer technologischen Angebotsseite muss auch die Nachfrage für eine hohe Marktdurchdringung vorbereitet werden. Dazu müssen die Endkunden als Kernakteur in den Fokus gerückt werden, da sie letztlich mit ihren Kaufentscheidungen die Flottenzusammensetzung bestimmen.

8 Strategischen Implikationen für die deutsche Automobilindustrie (AP5.2)

In den vorherigen Kapiteln wurde unter Berücksichtigung der Marktentwicklung das technologisch und wirtschaftlich realistische CO₂-Reduzierungspotenzial in Europa bis 2020 ermittelt. Da sich die durchschnittlichen CO₂-Flottenwerte als Ergebnis der einzelnen herstellerspezifischen Flottenwerte berechnen, soll im Folgenden untersucht werden, welche Flottenwerte für Hersteller mit unterschiedlichen Produktportfolios erzielt werden können.

Darüber hinaus werden aufbauend auf den Ergebnissen der Entwicklungsszenarien Implikationen und Handlungsempfehlungen für die Hauptakteure, d.h. Fahrzeughersteller (OEM), Zulieferer und die Politik, aufgezeigt.

8.1 Fahrzeughersteller

Im Jahr 2010 wiesen die OEM bezogen auf den europäischen Fahrzeugmarkt unterschiedliche Abstände ihrer CO₂-Flottenemissionen zu den jeweiligen Grenzwerten für 2015 und 2020 auf. Bei den Volumenherstellern zeigten 2010 die Marken Fiat, Peugeot, Citroen und Toyota einen besonders geringen Grenzwertabstand, im Vergleich z.B. zur deutschen Marke VW. Unter den Premiumherstellern setzte sich vor allem die BMW Group mit einem niedrigen CO₂-Flottenwert von den Wettbewerbern ab. Der Daimler-Konzern war 2010 mit ca. 24 g CO₂/km am weitesten von seinem spezifischen CO₂-Flottenzielwert für 2015 entfernt.

Daraus resultiert, dass die Fahrzeughersteller unterschiedliche Voraussetzungen haben, um die verabschiedeten und geplanten Grenzwerte zu erreichen. Im Folgenden werden die möglichen CO₂-Flottenwerte für drei abstrahierte Fahrzeughersteller mit unterschiedlichen Produktportfolios untersucht. Anschließend werden als Implikation Handlungsempfehlungen für alle Fahrzeughersteller formuliert.

8.1.1 Berechnung von CO₂-Flottenwerten für abstrahierte Fahrzeughersteller

Wie bereits dargestellt unterscheidet sich die Ausgangsposition für jeden Fahrzeughersteller. Hierfür sind zum einen Unterschiede in den verwendeten Technologien verantwortlich und zum anderen haben die verkauften Segmente, Motorisierungen und Ausstattungen einen wichtigen Einfluss auf den CO₂-Flottenwert. Die zuletzt genannten Faktoren sind dabei für einen Hersteller aufgrund der korrespondierenden Kundengruppen und -anforderungen schwieriger zu beeinflussen.

In der folgenden Abb. 8-1 werden die Produktportfolios der volumenstärksten Fahrzeughersteller nach der bereits eingeführten Segmentierung einander gegenübergestellt und zu drei Referenzfahrzeugherstellern abstrahiert. In den nachstehenden Berechnungen werden somit ein Kleinwagen-, ein Mittelklasse- und ein Premiumhersteller mit dem entsprechenden Produktportfoliomix berücksichtigt. Die Ergebnisse stehen somit repräsentativ für ausgewählte Fahrzeughersteller.

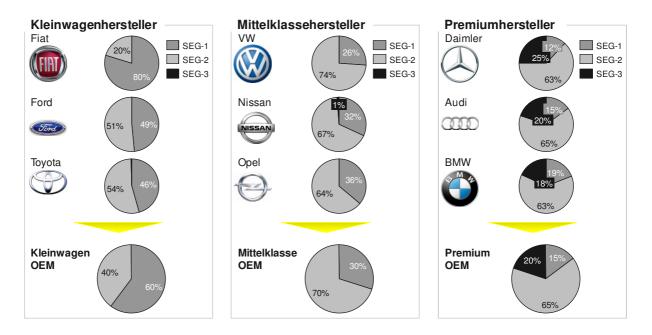


Abb. 8-1: Abstrahierte Produktportfolios für drei Referenzfahrzeughersteller

Zur Berechnung der CO₂-Flottenwerte für die Referenzfahrzeughersteller wird das im vorangegangenen Kapitel eingeführte Berechnungsmodell mit den Rahmenparametern des realistischen Szenarios ausgewählt. Damit wird auch das Verhältnis zwischen gewerblichen und privaten Kunden sowie zwischen Benzin und Diesel-Fahrzeugen konstant gehalten.

Das Ergebnis der Berechnungen für den Kleinwagenhersteller bei sechs Jahren Investitionszeitraum zeigt, dass der spezifische Zielwert um ca. 9 bis 16 g CO₂/km, bei ΔHK=40 bzw. 80 % verfehlt wird. Die CO₂-Emissionen des Mittelklasseherstellers mit einem deutlich größeren SEG-2 Marktanteil werden sich auf ca. 8 bis 12 g CO₂/km annähern. Die Flottenwerte des Premiumherstellers, dessen Produktportfolio sich aus SEG-1 bis SEG-3 Fahrzeugen zusammensetzt, weisen noch einen Abstand von 8 bis 11 g CO₂/km auf, vgl. Abb. 8-2.

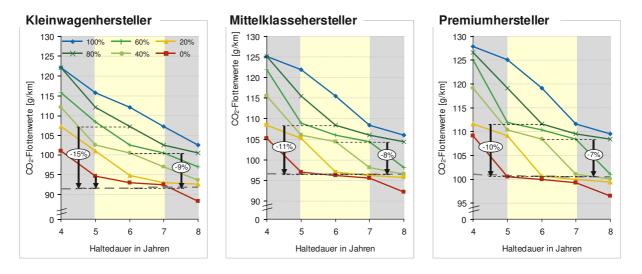


Abb. 8-2: CO₂-Flottenwerte für Referenzfahrzeughersteller im Jahr 2020

Neben der reinen Betrachtung der spezifischen CO₂-Flottenemissionen ist auch die Korrelation zum Flottengewicht entscheidend. Die Abb. 8-3 zeigt die Entwicklung der CO₂-Emissionen in Abhängigkeit der Differenz zwischen Endkundenlistenpreis und Herstellungskosten (ΔHK) über der Fahrzeugmasse für die drei Referenzfahrzeughersteller.

Die dargestellten Zielwertgeraden für 95 g CO_2 /km bei unterschiedlichen Referenzmassen (M_0 = 1.372 kg; $M_{100\%}$ = 1.325 kg; $M_{0\%}$ = 1.244 kg] sind mit einer Geradensteigung von a_1 = 0,0457 eingezeichnet. Der dargestellte Entwicklungspfad für alle Fahrzeughersteller basiert zu einem signifikanten Teil auf Leichtbaumaßnahmen. Sollte der Vorschlag der EU-Kommission von a_2 = 0,0333 umgesetzt werden, wird die Last zwischen Kleinwagen- und Premiumherstellern neu verteilt. Für einen Mittelklassehersteller hat die Änderung der Geradensteigung tendenziell eher geringe Auswirkungen. Die Darstellung belegt den Bedarf an einer Anpassung der Referenzmasse M_0 im Rahmen der Gesetzgebung, da sich die meisten Fahrzeugflottengewichte deutlich reduzieren werden.

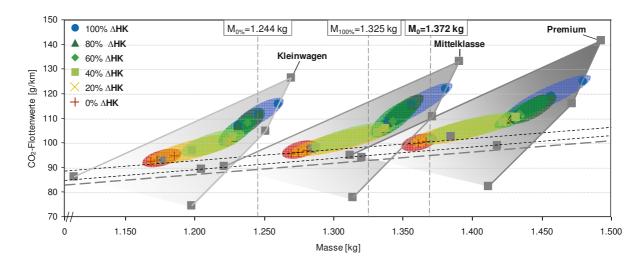


Abb. 8-3: CO₂-Flottenwerte und Flottengewichte für versch. OEM mit a_1 =0,0457

8.1.2 Handlungsfelder für Fahrzeughersteller

Jeder Fahrzeughersteller muss auf Basis der individuellen Voraussetzungen seine Handlungsmöglichkeiten evaluieren, um seine spezifischen Zielwerte zu erzielen. Sonderregelungen im Hinblick auf eine Ausnahme von der Regulierung gelten dabei in der Regel nur für Nischenhersteller außerhalb eines verbundenen Unternehmens. Abb. 8-4 zeigt eine Übersicht an möglichen Handlungsfeldern für Fahrzeughersteller im Kontext der europäischen CO₂-Regulierung zwischen der strategischen und operativen Ebene.

Auf der obersten Ebene müssen Entwicklungsstrategien anhand von F&E-Aktivitäten und der Produktplanung im Kontext der steigenden Bedeutung von Energieeffizienz und CO₂-Emissionen neu ausgerichtet werden. Neue Technologien werden dabei häufig "Top-Down" in die Fahrzeuge integriert, d.h. beginnend mit dem Einsatz in höheren Segmenten, welche als Innovationsträger dienen. Neben der Absenkung der eigenen Flottenemissionen besteht auch die Möglichkeit, dass sich Hersteller durch das sogenannte "Pooling" zu Emissionsge-

8

meinschaften zusammenschließen. Dies stellt vor allem für Nischenhersteller von Luxusfahrzeugen oder Sportwagen, welche keine Sonderregelung in Anspruch nehmen können, eine Möglichkeit zur Vermeidung von Strafzahlungen dar.



Abb. 8-4: Handlungsfelder für Fahrzeughersteller

Grundsätzlich verursachen CO₂-Technologien mit ansteigenden CO₂-Zielwerten höhere Kosten. Daher wird für die Industrie in Zukunft weiterhin ein wichtiges Ziel darin bestehen, die Entwicklungs- und Produktionskosten kontinuierlich zu senken. Ein wichtiges Instrument zur Senkung von Kosten stellt die Generierung und Ausnutzung von Skaleneffekten dar. Hersteller mit hohen Absatzvolumen, z.B. die Marken der Volkswagen AG, haben hierbei einen großen Gestaltungsspielraum. So lassen sich über die Nutzung von gemeinsamen Fahrzeugarchitekturen und die Umsetzung von modularen Baukästen Synergien in der Entwicklung, Beschaffung und Produktion freisetzen, indem sich Fahrzeuge "standardisierte Komponenten" in großen Stückzahlen teilen. Im Fall des Volkswagenkonzerns werden z.B. in Zukunft ca. 30 Konzernmodelle auf zwei Baukästen basieren, dem modularen Längs- und Querbaukasten [VOL12c].

Weiterhin stellt die zeitliche Dimension eine besondere Herausforderung dar. Technologien müssen zunehmend in kürzeren Zeitspannen entwickelt und in das Fahrzeug integriert werden, um kommende Grenzwerte erfüllen zu können und die Einhaltung global divergenter Standards zu gewährleisten. Gleichzeitig muss ein hohes Qualitätsniveau erhalten bleiben, damit Kunden nicht das Vertrauen in neue Technologien, z.B. den Hybridantrieb verlieren. Diese hohen Anforderungen an die Entwicklung von Effizienztechnologien wird es in Zukunft erschweren, dass jeder einzelne Akteur jeden Technologiepfad entwickelt. So ist damit zu

rechnen, dass in Zukunft vermehrt horizontale Kooperationen zwischen einzelnen Herstellern und vertikale Kooperationen mit Zulieferern entstehen werden. Dadurch können Technologien wie Antriebsaggregate oder Hybridmodule zwischen OEM ausgetauscht oder in einem Technologiebereich gemeinsame Entwicklungsaktivitäten durchgeführt werden. Beispiele für derzeitige Motorenkooperationen sind Partnerschaften zwischen BMW und PSA, Daimler und Renault sowie zwischen Volvo und Ford. Auf der vertikalen Wertschöpfungsebene könnten in Zukunft vermehrt Entwicklungsaufträge an Zulieferer vergeben werden, um Ressourcen und Zeit zu sparen sowie auf spezialisiertes Wissen zurückzugreifen. Außerdem könnten bereits fertig entwickelte Technologiemodule, z.B. Hybrid-Technologien oder effiziente Getriebe eingekauft werden. Der Zulieferer kann hier über den Verkauf der Technologien an mehrere OEM Skaleneffekte generieren und den Herstellern die Technologien günstiger anbieten. Weiterhin könnten die OEM Entwicklungsabteilungen für das Thema CO₂ und Energieeffizienz schaffen oder Cross-Funktionale-CO₂-Teams einsetzen, um das hochvernetze Thema im Entwicklungsprozess und darüber hinaus zu steuern.

Damit der Kunde bereit ist, den Aufpreis für CO₂-Technologien zu zahlen, sollten Hersteller ihr Produkt noch stärker als bisher mit den Attributen CO2-Ausstoß und Energieeffizienz bewerben. Dabei muss das Umweltbewusstsein beim Kunden geschärft werden, um die Bedeutung der CO₂-Emissionen als Kaufkriterium zu erhöhen. Da bei einigen Kunden das Verständnis über den Zusammenhang zwischen CO2 und Kraftstoffverbrauch noch nicht ausreichend vorhanden ist, sollte darüber hinaus kommuniziert werden, dass sich der Mehrpreis für CO₂-Technologien über Kraftstoffeinsparungen amortisieren kann. Diesbezüglich kann der Kunde zu einer Betrachtung der "Total-Cost-of-Ownership" (TCO) angeregt werden, welche nicht nur den Kaufpreis bewertet, sondern auch die Nutzungsphase in der finanziellen Bewertung berücksichtigt. Zusätzlich kann der Fokus des Kunden auf eine "Life-Cycle"-Betrachtung gelenkt werden, welche eine ökologische Bilanzierung über die Fahrzeuglebensdauer vornimmt. Dabei wird neben der Emissionsentstehung bei der Fahrzeugnutzung auch die Rohstoffförderung, Produktion und das Recycling nach der Nutzungsphase einbezogen. Diese Perspektive führt zu einer ganzheitlichen ökologischen Betrachtung von Technologien, die der Hersteller gegenüber den Kunden markenprägend einsetzen kann. Dies ist derzeit bereits im Consumer-Bereich, z.B. bei Laptops, zu beobachten [TOS12]. Umwelt-Labels der OEM, z.B. "BlueMotion" von VW, "eco:Drive" von Fiat oder "Efficient Dynamics" von BMW, stellen ein mögliches Instrument zur ökologischen Markenprägung dar und spielen daher in Zukunft eine wichtige Rolle.

Im internationalen Vergleich sticht im Bereich von CO₂-Technologien besonders der japanische OEM Toyota mit der Hybrid-Technologie hervor. Beispielsweise hat der Hersteller mit dem Modell Prius seit 1997 bislang große Felderfahrungen im Bereich der Hybridfahrzeuge sammeln können und setzt seinen Hybridantrieb zusammen mit seiner Luxusmarke Lexus zukünftig in mehr als sieben Modellen vom Kleinwagen bis zur Luxuslimousine ein. Dabei kann der Toyota-Konzern seinen Hybridantrieb über Skaleneffekte vergleichsweise günstig anbieten. So kann der Kleinwagen Yaris Hybrid ab Mitte 2012 für ca. 17.000 € verkauft werden, was vergleichbar mit dem Preis eines dieselbetriebenen Kleinwagens ist [TOY12]. Dies

zeigt den aktuellen Vorsprung Toyotas im Vergleich zu deutschen Herstellern, welche erst seit kurzem Hybridfahrzeuge im Premiumsegment auf dem Markt anbieten.

8.2 Automobilzulieferer

8

Für die europäischen Automobilzulieferer liegt eine andere Ausgangslage bei der Bewertung der Implikationen der CO₂-Gesetzgebung vor. So werden keine spezifischen Zielwerte für die Produkte der Zulieferindustrie formuliert. Dennoch entwickeln und produzieren Zulieferer Lösungen für die Produktportfolios der Fahrzeughersteller und sind somit direkt abhängig vom wirtschaftlichen Erfolg der Fahrzeughersteller und der Fahrzeuge im Markt. Daher kann der Trend hin zu CO₂- bzw. Effizienztechnologien im Fahrzeug zugleich Chancen und Risiken bedeuten, vgl. Abb. 8-5.

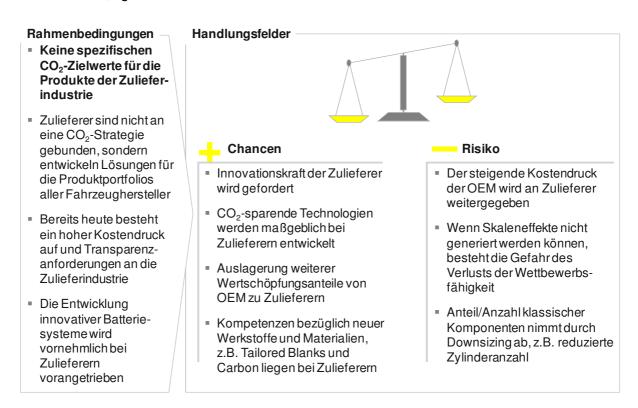


Abb. 8-5: Chancen und Risiken für Zulieferer durch die CO₂-Gesetzgebung

Die herausfordernden CO₂-Ziele der Fahrzeughersteller fordern die Entwicklung neuer Technologien. Herbei kann insbesondere die deutsche Zulieferindustrie profitieren, welche sich durch ihre große Innovationskraft auszeichnet. Da der Verbrennungsmotor zumindest bis 2020 weiterhin die dominierende Rolle spielen wird, kann das Technologiewissen für effiziente Verbrennungsmotoren im Rahmen von weltweiten Herstellerkooperationen genutzt werden. So werden die größten Zulieferer mit ihren Innovationen maßgeblich zur Zielerreichung beitragen.

Darüber hinaus wird erwartet, dass die Fahrzeughersteller, z.B. im Zuge der Elektrifizierung des Antriebstrangs, weitere Wertschöpfungsanteile an Zulieferer auslagern werden. Bei den

Fahrzeugherstellern wird dabei eine zunehmende Fokussierung auf markenprägende Komponenten, das Gesamtfahrzeugkonzept und Markenimage erfolgen. Nicht-markenprägende Komponenten werden hingegen an Zulieferer vergeben. Hier bietet der Trend zur Elektrifizierung Chancen für Zulieferer durch das Hinzukommen neuer nicht-markenprägender Komponenten im Automobil. So erhalten über die Einführung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen Komponenten wie elektrische Maschinen, Batterien oder Spannungswandler Einzug in das Fahrzeug, welche vom Kunden nicht unmittelbar wahrgenommen werden bzw. dem OEM keine signifikanten Differenzierungsmerkmale bieten. Insbesondere die Entwicklung von innovativen Batteriesystemen und Batteriezellen wird vornehmlich bei Zulieferunternehmen vorangetrieben.

Neben den betrachteten Chancen kann der technologische Wandel in der Automobilindustrie für Zulieferer auch Risiken bedeuten. Einen bedeutenden Faktor stellt der ansteigende Kostendruck bei den OEM dar, der an die Zulieferer weitergegeben wird. Wie bereits für die Fahrzeughersteller erläutert, sind Skaleneffekte ein zentraler Schlüssel zur Senkung der Stückkosten. Für Zulieferunternehmen bietet sich die Möglichkeit, Skaleneffekte zu erzeugen, indem sie Technologien an mehrere Hersteller verkaufen. Kann jedoch eine kritische Menge zur Generierung von Skaleneffekten nicht erreicht werden, besteht die Gefahr für kleinere Lieferanten, bei den Kosten nicht mehr konkurrenzfähig zu sein. Daher könnte es in der Zuliefererbranche in Zukunft vermehrt zu Konsolidierungen kommen. Handlungsoptionen zur Vermeidung dessen liegen z.B. im Zusammenschluss von einzelnen Zulieferern oder im Aufbau von Kooperationsnetzwerken, so dass Skaleneffekte generiert und die Entwicklungsaufwendungen auf die gesamte Ausbringungsmenge umgelegt werden können.

Außerdem kann die Substitution bisheriger Komponenten im Automobil durch neue Technologien das etablierte Absatzpotenzial eines Zulieferer-Produktportfolios schwächen. Neue Technologietrends, z.B. Downsizing, haben zur Folge, dass der Anteil bzw. die Anzahl klassischer Antriebskomponenten im Automobil abnimmt. Bauteile, z.B. Kolben, Zylinder, Wellen oder Gehäuse, werden dabei kleiner dimensioniert oder deren Anzahl verringert. Zudem kann für den Zeitraum nach 2020 ein höherer Anteil an batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen zu einer Bedrohung von Zulieferern des konventionellen Verbrennungsmotors führen. Auch die Durchführung von Leichtbau-Maßnahmen im Fahrzeug bedeutet für Zulieferer in erster Linie den Wegfall oder die Substitution bisheriger Materialien, so dass z.B. Stahlhersteller durch Umsatzrückgänge bedroht sind. Durch eine Ausrichtung der Produktstrategie auf innovative Lösungen im Bereich von Leichtbautechnologien, z.B. "Tailored Blanks" oder höherfeste Stähle, könnten drohende Absatzeinbrüche kompensiert werden. Ein nachhaltiger Erfolg wird erzielt, wenn bei der Bewertung unterschiedlicher Technologien auch die Life-Cycle-Emissionen betrachtet werden, um ökologisch sinnvoll in einem ganzheitlichen Ansatz die Emissionen zu senken.

Das Produktportfolio betroffener Zulieferer muss langfristig restrukturiert werden, um Rückgänge des Umsatzes zu verhindern. Dazu müssen die Zulieferunternehmen in einem ersten Schritt die zu Grunde liegenden Megatrends und Treiber erfassen, so dass darauf aufbauend eine individuelle Strategie zur Anpassung an die Umfeldveränderungen in der Automobilindustrie entworfen wird. Dazu muss evaluiert werden, welche Produkte aufgrund der Megatrends in Zukunft an Bedeutung verlieren und welche neuen Absatzpotenziale für das Unternehmen ergeben könnten. Ein für die Zukunft sicheres und erfolgsversprechendes Technologiefeld kann in CO₂-Technologien gesehen werden, welche zukünftig kontinuierlich und intensiviert weiterentwickelt werden sollten.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die CO₂-Gesetzgebung für die Zulieferunternehmen eher Chancen als Risiken darstellt.

8.3 Handlungsfelder Politik

Die Politik hat auf europäischer Ebene die Aufgabe, die CO₂-Richtlinie für 2020 und langfristig darüber hinaus sowie die korrespondierenden Rahmenbedingungen zu definieren. Die CO₂-Regulierungen setzten maßgebliche Ideen des "Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050" der Europäischen Kommission und dem Weißbuch zur Verkehrspolitik um. Die Kernherausforderung für die Weichensteller auf EU-Ebene ist die Entwicklung der Rahmenbedingungen des Marktes für effiziente und emissionsarme Fahrzeuge.

Bei der Gestaltung der aktuellen und zukünftigen EU CO₂-Gesetzgebung werden neben der tatsächlichen Höhe der Zielwerte auch die Aspekte der Parameter und des Bemessungszyklus Bestandteil der Diskussion sein.

Bei der Ausgestaltung der zukünftigen EU-Grenzwertkurve ist es empfehlenswert, den Einbezug weiterer Nutzwertparameter, z.B. der Fahrzeugstandfläche, weiter zu eruieren. Dadurch könnte z.B. eine angemessene Bewertung von Maßnahmen im Bereich des Leichtbaus vorgenommen werden. Grundsätzlich ist es dabei wünschenswert, wenn die globalen CO₂- und Abgas-Gesetzgebungen harmonisiert würden, da viele der Fahrzeughersteller global aufgestellt sind und ihre Produkte in mehreren Märkten anbieten. Dies würde vor allem den Aufwand zur Homologation reduzieren und damit die Fahrzeugentwicklung beschleunigen sowie Entwicklungskosten und Ressourcen einsparen.

Mit der Initiative zur Entwicklung der "Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure" (WLTP) ist hier bereits ein wichtiger Prozess in Gang gesetzt worden. Dieser hat das Ziel, ein global einheitliches Messverfahren und einen einheitlichen Fahrzyklus zu generieren. Mit dem WLTP könnte außerdem ein Fahrzyklus geschaffen werden, welcher im Vergleich zum NEFZ näher am realen Fahrprofil des Kunden liegt, und dadurch auch eine realistische sowie zielgerichtete Gewichtung der verschiedenen CO₂-Technologien ermöglicht. Bei der Neugestaltung des Fahrzyklus sollten z.B. eine Anhebung der Durchschnittsgeschwindigkeit, der Einbezug von elektrischen Verbrauchern wie Klimaanlagen, sowie die Berücksichtigung der elektrischen Energieeffizienz und der CO₂-Bilanz des Strommix für die Elektromobilität diskutiert werden.

Da die gesetzten Zielwerte der EU die Automobilindustrie deutlich unter Druck setzen und dabei nicht alle Akteure gleich belasten, bieten ausgewählte Flexibilisierungsmaßnahmen die

Chance, Technologieentwicklungen zu Beschleunigen bzw. Anreize für fortschrittliche Innovationen zu entwickeln. Die Auswirkungen alternativer Ausgestaltungsoptionen von Flexibilisierungsinstrumenten auf die Erreichung von Flottenzielwerten in einem Zieljahr oder in einer Zielperiode müssen dabei berücksichtigt werden.

Als Flexibilisierungsmaßnahmen kommen dabei die Super Credits, Öko-Innovationen, Credit/ Debit Systeme sowie Emissionszertifikate in Betracht. Darüber hinaus kann der Pkw-Markt über diverse fiskale Maßnahmen in Abhängigkeit der CO₂-Emission gesteuert werden.

Super Credits

Derzeit sind Fahrzeuge mit besonders emissionsarmen Antrieb, z.B. Plug-In-Hybridfahrzeuge, bzw. CO₂-neutralem Antrieb, z.B. Brennstoffzelle oder Batterieelektrisch, mit besonders hohen Kosten verbunden. Daher sollten den Fahrzeugherstellern Anreize gesetzt werden, diese trotz der hohen Herstellungskosten und somit gegebenenfalls eingeschränkten Wirtschaftlichkeit in den Markt einzuführen.

Weiterhin könnte eruiert werden, ob weitere Fahrzeugtypen, z.B. batterieelektrische L5e und L7e Fahrzeuge, die einen Pkw ersetzen, auch positiv berücksichtigt werden könnten.

Öko-Innovationen

Die bislang diskutierten technologischen Maßnahmen betrachteten ausschließlich die CO₂-Emissionen, die ein Pkw auf einem Prüfstand im NEFZ-Zyklus emittiert. Da es jedoch weitere Maßnahmen gibt, welche die Effizienz des Fahrzeugs in der Realität optimieren, jedoch nicht in diesem Zyklus abgebildet werden können, sollte die Möglichkeit der Anrechnung solcher Technologien geben.

Dabei kann der Gesetzgeber maßgeblich beeinflussen, welche Maßnahmen angerechnet werden können, indem er die Rahmenbedingungen für das Anrechnungsverfahren definiert. Hierbei sind bei der aktuellen Definition zwei besondere Grenzen markiert, welche die beteiligten Akteure vor Herausforderungen stellen. Einerseits wird gefordert dass die einzelne Maßnahme eine Wirksamkeit von mind. 1 g CO₂/km aufweist. Andererseits wird gefordert, dass die Innovation in einem Referenzjahr nur eine Nischentechnologie war und noch nicht in der breiten Masse eingeführt war.

Hier kann der Gesetzgeber einerseits auch eine Zulassung von Maßnahmenpaketen mit insgesamt 1 g CO₂/km Wirksamkeit oder von einzelnen Maßnahmen mit weniger als 1 g CO₂/km prüfen. Darüber hinaus ist die Definition der Marktdurchdringung relativ frei gewählt worden, so dass auch hier eine präzise klare höhere oder niedrigere Definition in absoluten Zahlen möglich ist.

Banking-Systeme

Eine weitere Flexibilisierungsmaßnahme ist die Einführung eines Banking-Systems für die Fahrzeughersteller. Die aktuelle CO₂-Gesetzgebung schreibt eine Einhaltung der Zielwerte

mit einer Strafzahlung vor, falls diese überschritten werden, so dass jeder Fahrzeughersteller versuchen wird, möglichst nahe an seinen spezifischen Zielwert heranzukommen. Die Idee des Banking-Systems greift diesen Aspekt auf und formuliert einen Anreiz, die Grenzwerte zu unterschreiten, denn die Unterschreitung wird dem Hersteller in einer Gutschrift festgehalten. Diese ermöglicht ihm, zu einem späteren Zeitpunkt mit verschärften Zielwerten eine mögliche Überschreitung aufgrund von saisonalen und trendbedingten Absatzschwankungen auszugleichen, ohne eine Strafe zu zahlen.

Damit keine Verwässerung der Ziele eintritt, sollte das Banking-System so formuliert werden, dass eine Überschreitung eines spezifischen Zielwerts nur ohne Strafzahlung möglich wird, wenn vorher eine entsprechende Unterschreitung stattgefunden hat.

Emissionszertifikate

Das vorher beschriebene Banking-System könnte ebenfalls die Grundlage für einen Emissionszertifikatehandel eröffnen. Sofern ein Fahrzeughersteller seinen spezifischen CO₂-Zielwert unterschreitet, könnte er diese Unterschreitung als Zertifikat ausgestellt bekommen und an andere Fahrzeughersteller, die über ihren Zielwerten liegen, verkaufen. Somit könnten diese Hersteller ihre Strafzahlungen reduzieren oder ganz vermeiden.

Fiskale Maßnahmen

Neben den Maßnahmen, die der Gesetzgeber umsetzen kann, um die CO₂-Gesetzgebung zu flexibilisieren, kann er ebenfalls die Rahmenbedingungen für die Produkte im Markt beeinflussen. Beim Kauf und während des Unterhalts eines Fahrzeugs werden eine Vielzahl an unterschiedlichen Steuern fällig. So sind in der EU Zulassungs-, Luxus- und Mehrwertsteuer bei der Erstzulassung üblich. Während des Fahrzeugbetriebs ist in der Regel eine Jahreszulassungssteuer in Abhängigkeit des CO₂-Ausstoßes fällig und häufig eine Autobahn- bzw. Straßenmaut. Darüber hinaus besteht ein Großteil der Kraftstoffkosten aus Steuern, die verschiedensten Verwendungen anschließend zugeführt werden. Weiterhin werden in einigen Staaten Gebrauchtwagenzulassungssteuern fällig.

Dieses komplexe System der Besteuerung beeinflusst maßgeblich, für welche Motorisierung sich ein gewerblicher bzw. privater Endkunde entscheidet. Die Auswirkungen unterschiedlicher fiskaler Regelungen werden im europäischen Vergleich sichtbar, z.B. Belgien (75 % Diesel-Marktanteil) vs. Niederlande (28 % Diesel-Marktanteil).

9

9 Zusammenfassung

Die Automobilindustrie sieht sich derzeit einer weitreichenden Veränderung ihres Umfelds gegenüber. Ein wesentlicher Megatrend, welcher zu einer Veränderung heutiger Fahrzeugund Antriebskonzepte führt, sind steigende Emissionen im Kontext des Klimawandels. Das Treibhausgas CO₂ hat den größten Anteil am globalen anthropogenen Treibhauseffekt und stellt somit einen zentralen Hebel zur Beschränkung des vom Menschen verursachten Klimawandels dar.

In der Folge kann weltweit die Einführung von CO₂-Vorschriften beobachtet werden. Die Untersuchung der Regulierungen in Europa, USA und Japan zeigte Unterschiede bei den Grenzwerten, der jeweiligen Bemessungsgröße und den zu Grunde liegenden Fahrzyklen. Eine Normierung der Flottengrenzwerte für den Zeitraum 2015 auf den NEFZ ergab, dass die strengsten Flottengrenzwerte in Japan und Europa vor den USA gelten. Bis 2020 bzw. 2025 ist in allen Regionen eine weitere Verschärfung der Grenzwerte geplant. Für das Jahr 2020 ist in Europa ein CO₂-Flottenzielwert von 95 g CO₂/km definiert.

Das Marktvolumen in Europa hat sich seit 2007 aufgrund der Finanz- und Wirtschaftskrise rückläufig entwickelt. Während in 2011 noch 13,1 Mio. Neuzulassungen erreicht wurden, wird prognostiziert, dass sich der Markt bis 2020 wieder auf das Vorkrisenniveau von ca. 15 Mio. Einheiten erholt. Innerhalb von Europa bildet Deutschland den volumenstärksten Markt mit 3,2 Mio. Fahrzeugen. Im Hinblick auf die Marktzusammensetzung nach Fahrzeugsegmenten zeichnete sich Europa 2010 im Vergleich zu Deutschland durch einen höheren Anteil an Kleinst- und Kleinwagen aus. Die Fortschreibung der in diesem Kapitel identifizierten Segmenttrends ergab für 2020 in Europa einen Anstieg der kleineren Segmente.

Bei der Verteilung der Antriebs- und Kraftstoffvarianten konnte im Jahr 2010 in der EU im Vergleich zu Deutschland ein signifikant höherer Dieselanteil identifiziert werden. Vor allem die größeren Fahrzeugsegmente zeichneten sich dabei durch einen hohen Dieselanteil aus. Elektrofahrzeuge erreichten jeweils nur Anteile von deutlich unter 1 %. Sowohl in Deutschland als auch in Europa wird für 2020 ein Anstieg der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge und Plug-in-Hybride zu Lasten von benzinbetriebenen Fahrzeugen erwartet, wobei im Hinblick auf die Marktanteile batteriebetriebener Elektrofahrzeuge eine große Unsicherheit herrscht. Im Rahmen der Studie werden im realistischen Szenario für Europa ca. 6 % Elektrofahrzeuge angenommen. Insgesamt stellt der Verbrennungsmotor für den Zeithorizont bis 2020 weiterhin das dominierende Antriebskonzept dar.

Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der europäischen Neuwagenflotte betrugen 2010 140,5 g CO₂/km. Bei dem Vergleich der Fahrzeugflotten auf Herstellerebene wiesen besonders die deutschen Premiumhersteller vergleichsweise hohe Flottenwerte auf. Bei der Untersuchung der europäischen Segmente im Hinblick auf CO₂-Emissionen wurde deutlich, dass vor allem das Sportwagen- und Luxussegment sowie Geländewagen und Oberklasse-Fahrzeuge derzeit noch weit abseits ihrer Zielwerte liegen.

Eine europäische Verordnung für 2020 sollte aufgrund des Planungshorizonts der Hersteller von fünf bis zehn Jahren möglichst zeitnah definiert werden. Während umfangreiche technologische Änderungen über eine Neugestaltung der Fahrzeug-Plattformwechsel ca. alle sechs bis acht Jahre stattfinden können, sind kleinere Anpassungen im Rahmen von Facelifts in der Regel alle drei bis vier Jahre möglich. Die Antriebsstrangzyklen sind dagegen länger und betragen zehn bis 15 Jahre. Zur Reduzierung der Komplexität und Fehlerhäufigkeit findet die Einführung der Fahrzeugmodelle und Motoren in der Regel versetzt statt. Auf Technologieebene ist die Zeitspanne bis zum Erreichen der Serienreife und dem Einsatz im Fahrzeug stark abhängig vom aktuellen Entwicklungsstand und der Komplexität und variiert zwischen 18 Monaten und fünf Jahren.

Die zentralen Hebel zur CO₂-Reduzierung stellen eine Reduzierung der Fahrwiderstände und eine Effizienzerhöhung der Energiewandlung dar. So kann der Energiebedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände über eine Rollwiderstandsreduzierung, sowie Leichtbau- und Aerodynamikmaßnahmen gesenkt werden. Auf die Energiewandlung kann dagegen über verschiedene motorische Maßnahmen, z.B. Downsizing, sowie über Getriebetechnologien, die Optimierung von Nebenaggregaten und sonstigen Maßnahmen, Einfluss genommen werden. Außerdem stellt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs in Form von Hybrid- und Elektrofahrzeugen eine Möglichkeit zur Effizienzerhöhung der Energiewandlung dar.

Zur wirtschaftlichen Bewertung der einzelnen Technologien bezogen auf den Zeithorizont 2020 wurden die ermittelten CO₂-Reduzierungspotenziale mit den angesetzten Herstellerkosten bei Volumenproduktion in 2020 in Relation gesetzt. Hierzu wurden die Technologien in Portfolio-Diagrammen visualisiert. Grundsätzlich ergab die Analyse, dass höhere CO₂-Reduzierungspotenziale auch einen Anstieg der Kosten und einen längeren Zeitraum bis zur Serienreife bedingen, da sie häufig Eingriffe in die Fahrzeugplattform erfordern.

Anschließend wurden die Technologien anhand eines strukturierten Vorgehens in kosteneffizienten Technologie-Paketen zusammengefasst. Als Ergebnis des Auswahlprozesses gingen drei aufeinander aufbauende Technologiestufen hervor, die den Durchschnitt der zu erwartenden technologischen Entwicklung darstellen. Die Pakete wurden spezifisch pro Fahrzeugsegment und Kraftstoff gebildet und weisen eine Abstufung im Hinblick auf die CO₂-Reduzierung, Kosten und die zeitliche Verfügbarkeit auf. Zusätzlich wurden zwei der Paketstufen als Alternative zu den sonst konventionellen Technologiepaketen mit Hybrid-Technologien zusammengestellt. Gas-, Elektrofahrzeuge und Plug-in-Hybride wurden anhand von Szenarioannahmen mit dem Berechnungsmodell zusammgenfeührt.

Hierauf aufbauend wurden die gebildeten Technologiepakete auf die Neuzulassungsflotte, entsprechend der Marktverteilung für das Jahr 2020, angewandt. Durch die Annahme einer 100 % Marktdurchdringung je Technologiepaket lassen sich die maximalen technischen Grenzen der CO₂-Flottenemissionen ermitteln. Wird von einer konstanten Marktverteilung für 2020 gegenüber 2010 ausgegangen, lassen sich die Flottenemissionen mit konventionellen Maßnahmen auf 95 g CO₂/km senken. Werden alle konventionellen Fahrzeuge mit Hybridantrieb ausgestattet sind aus technischer Sicht 81 g CO₂/km möglich. Im Rahmen der Analyse

9

wird jedoch davon ausgegangen, dass sich die Marktverteilung bis 2020 verändert und Elektrofahrzeuge einen Anteil von 6 % erreichen werden. Demnach sind aus technischer Sicht mit konventionellen Maßnahmen CO₂-Flottenemissionswerte von 90 g CO₂/km und mit 100 % Hybridantrieben sogar 78 g CO₂/km möglich. Für diese Technologiepakete fallen zusätzliche Herstellungskosten in Höhe von 2.687 € bzw. 4.981 € je Hybridpaket an. Diese Herstellungskosten umfassen dabei Material-, Fertigungs- und anteilige Entwicklungskosten bei Massenproduktion im Jahr 2020.

Diese Technologiekosten werden an die gewerblichen und privaten Endkunden weitergegeben müssen, so dass die Nachfrage nach bestimmten Technologien im Fahrzeug im Wesentlichen durch das Verhältnis zwischen Mehrkosten und resultierender Kraftstoffeinsparung beeinflusst wird. Hierzu wurde ein wirtschaftliches Modell entwickelt, welches die unterschiedliche hohe Marktpenetration von kraftstoffsparenden Technologien in Abhängigkeit der wichtigsten Rahmenparameter je Segment abschätzt.

Im realistischen Szenario kann der Zielwert von 95 g CO₂/km bei 1.372 kg Referenzmasse von der gesamten EU-Fahrzeugflotte unter Berücksichtigung der erwarteten Marktentwicklung nur sehr schwer eingehalten werden. Bei Berücksichtigung des Unterschieds zwischen Endkundenlistenpreis und den Herstellungskosten von ca. 40 bis 80 % resultiert ein Abstand von ca. 8 bis 13 g CO₂/km zum spezifischen Zielwert von 95 g CO₂/km. Die Endkunden investieren in diesem Szenario durchschnittlich 1.900 € (Endkundenlistenpreis) in zusätzliche Technologien, welche sich über einem Betrachtungszeitraum von sechs Jahren amortisieren. Der hier ermittelte Abstand ist in einer Größenordnung, so dass er z.B. durch Ökoinnovationen oder durch Flexibilisierungsmaßnahmen deutlich reduziert werden kann. Für die Berechnung des Abstands wurde stets auh die Referenzmasse M angepasst. Sollte diese nicht kontinuierlich angepasst werden, erhöht sich der Abstand weiter.

Bei verordneter Zielerreichung muss die Lücke in Höhe von 8 bis 13 g CO₂/km geschlossen werden. Würden alle technischen Maßnahmen vor dem Hintergrund der besten Kosten-/Nutzeneffizienz genutzt werden, so wäre der Zielwert von 95 g CO₂/km für ca. 2.000 € zusätzliche Herstellungskosten erreichbar. Die europäische Automobilindustrie würde die durchschnittlichen zusätzlichen Kosten zur kosteneffizientesten Zielerreichung in Höhe von ca. 650 € bis 950 € (Herstellungskostenniveau) je Fahrzeug selbst tragen müssen. Dabei würden die Aufwände für Fahrzeughersteller mit einem Produktportfolio mit größeren Fahrzeugen nach oben vom Durchschnitt abweichen.

Auch im konservativen und progressiven Szenario wird der Zielwert von 95 g CO₂/km durch die Neuzulassungen unter Berücksichtigung der Differenz zwischen Endkundenlistepreis und Herstellungskosten ohne weitere Maßnahmen nicht erzielt, so dass die meisten Fahrzeughersteller Ökoinnovationen oder weitere Flexibilisierungsmaßnahmen zur Vermeidung hoher Strafzahlungen nutzen müssten.

Da sich der von der EU geforderte Zielwert von 95 g CO₂/km nicht alleine durch den Markt einstellen wird, intensiviert sich der Handlungsbedarf für die Fahrzeughersteller. Dabei müs-

9

sen die Hersteller auf Basis ihrer spezifischen Voraussetzungen individuelle F&E-Strategien entwerfen, um sich dem Megatrend CO₂-Emissionen und der resultierenden Umfeldveränderung anzupassen. Die Forschung und Entwicklung sind dabei immer schwerer nur durch einzelne Akteure zu realisieren, wodurch es vermehrt zu Kooperationen auf horizontaler Ebene zwischen Herstellern und auf vertikaler Ebene zwischen Zulieferern kommen wird, um Kosten zu sparen und Risiken zu verteilen. Ein wichtiger Stellhebel hierzu ist ebenfalls die gemeinsame Grundlagenforschung mit Universitäten zur Identifizierung von innovativen technischen Lösungen. Die Generierung von zusätzlichen Skaleneffekten ist dabei ein zentrales Instrument, um dem Kostendruck zu begegnen. Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Skaleneffekten ist die Anwendung von Baukastensystemen und Modularisierungsstrategien, welche die Anzahl von Gleichteilen über die Modellpalette erhöhen.

Für Zulieferer bieten die Umfeldveränderungen gleichzeitig Chancen und Risiken. Einerseits werden die etablierten Produkt-Portfolios durch neue CO₂- bzw. Effizienztechnologien, z.B. Downsizing oder Hybrid-Technologien, gefährdet. Anderseits ergeben sich durch eine zunehmende Wertschöpfungsverlagerung vom Hersteller zum Zulieferer Wachstumschancen. In Form der neuen Technologien kommen neue nicht-markenprägende Komponenten in das Fahrzeug, welche vom Hersteller an den Zulieferer weitergegeben werden. Der Hersteller konzentriert sich dagegen auf markenprägende Innovationen, das Fahrzeug-Gesamtkonzept und das Markenimage. Grundsätzlich haben Zulieferer darüber hinaus die Möglichkeit, ihre Technologien an mehrere Hersteller zu verkaufen und dadurch Skaleneffekte zu erzeugen.

Die Politik hat auf europäischer Ebene die Aufgabe, die CO₂-Richtlinie für 2020 und langfristig darüber hinaus sowie die korrespondierenden Rahmenbedingungen zu definieren. Die CO₂-Regulierungen setzten maßgebliche Ideen des "Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050" der Europäischen Kommission und dem Weißbuch zur Verkehrspolitik um. Die Kernherausforderung für die Weichensteller auf EU-Ebene ist die Entwicklung eines Marktes für effiziente und emissionsarme Fahrzeuge.

Bei der Gestaltung der aktuellen und zukünftigen EU CO₂-Gesetzgebung werden neben der tatsächlichen Höhe der Zielwerte auch die Aspekte der Parameter und des Bemessungszyklus Bestandteil der Diskussion sein. Da die gesetzten Zielwerte der EU die Automobilindustrie deutlich unter Druck setzen und dabei nicht alle Akteure gleich belasten, bieten ausgewählte Flexibilisierungsmaßnahmen die Chance, Technologieentwicklungen zu Beschleunigen bzw. Anreize für fortschrittliche Innovationen zu entwickeln. Dabei muss stets bedacht werden, dass es nicht das Ziel einer Flexibilisierungsmaßnahme sein sollte, die bestehenden CO₂-Ziele aufzuweichen. Als Anreiz- und Flexibilisierungsmaßnahmen kommen dabei die Super Credits, Öko-Innovationen, Credit/ Debit Systeme bzw. Banking/ Borrowing sowie Emissionszertifikate in Betracht. Darüber hinaus kann der Pkw-Markt über diverse fiskale Maßnahmen in Abhängigkeit der CO₂-Emission gesteuert werden.

10 Ausblick und zukünftiger Forschungsbedarf

Die vorliegende Studie beantwortet alle Fragestellungen, die gemeinsam mit dem Auftraggeber zum Start definiert worden waren. Dennoch entwickeln sich vielfältige Fragestellungen hinsichtlich der CO₂-Gesetzgebung stets dynamisch weiter, so dass abschließend einige Anknüpfungspunkte formuliert werden.

In einem ersten Schritt kann die Umfeldanalyse hinsichtlich legislativer Rahmenbedingungen sowie Marktstrukturen und –erfahrungen auf eine breitere Basis gestellt werden, da für die deutsche Automobilindustrie, mit hohem Exportanteil, die globalen CO₂-Gesetzgebungen ebenso Einfluss auf die Produktgestaltung haben. Daher wird es zukünftig interessant, weitere etablierte und Zukunftsmärkte, z.B. USA, China oder Indien in die Analysen zum Technologieeinsatz zu integrieren.

Des Weiteren ist eine Erweiterung des Fokus auf die Folgejahre 2025 und 2030 mit Blick auf die CO₂-Gesetzgebung und die zur Verfügung stehenden Fahrzeugtechnologien zielführend. Mehrere Technologien, die im Rahmen dieser Studie vor dem Hintergrund des Zeitfokus 2020 keine Relevanz entfalten, werden in den weiteren Jahren sukzessive zur Verfügung stehen. Hierbei werden lokal-emissionsfreie Antriebe, z.B. batterieelektrische Fahrzeuge und Wasserstofffahrzeuge, eine zunehmend wichtigere Rolle spielen.

Bei der Modellierung der Marktdurchdringung wurde in der vorliegenden Studie der Fokus auf eine realistische Marktbewertung gelegt. Dabei zeigte sich, dass die vorgestellte realistische Marktlösung, bei der die wirtschaftliche Situation des Einzelnen optimiert wird, von dem volkswirtschaftlichen Optimum abweicht. Zukünftig könnte neben der realistischen Marktlösung auch das volkswirtschaftliche Optimum untersucht und die Diskrepanz der Lösungsräume analysiert werden, um gezielte Handlungsempfehlungen zur Erzielung des volkswirtschaftlichen Optimums abzuleiten.

Im Einklang mit der Langfristroadmap 2050 der europäischen Kommission zur "wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft" ergeben sich weitere hoch interessante Fragestellungen, die den Fokus der CO₂-Gesetzgebung über die der Emissionen hinaus erweitern. In einem ersten Schritt kann hierbei eine Well-to-Wheel Analyse für die verschiedenen Energieträger, z.B. Benzin, Diesel, Ethanol, Gas, Strom, zielführend sein, welche die verschiedenen Energiewandlungsketten einbezieht. Darüber hinaus bieten Lebenszyklusanalysen, die neben der Nutzungsphase des Pkw auch die Produktion und das Lebensende mit einbeziehen einen interessanten Ansatz, insb. innovative Technologien, die auf besonderen Rohstoffen basieren, bezüglich ihrer Nachhaltigkeit zu bewerten. Hierbei kann insb. eine Untersuchung von elektrifizierten Fahrzeugkonzepten, z.B. Plug-In Hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugenkonzepten neue Ansätze für eine Nachhaltigkeitsbewertung von Technologien liefern.

11 Literatur 108

11 Literatur

[ABD11a] N.N.

Autobild online

http://www.autobild.de/artikel/mikroautos-auf-dem-vormarsch-studie-

1855631.html

Abruf: 22.01.2012

[ABD11b] N.N.

Autobild online

http://www.autobild.de/artikel/abwrackpraemien-in-europa-945389.html

Abruf: 22.01.2012

[ABD11c] N.N.

Autobild online

http://www.autobild.de/artikel/eu-automarkt-2011-2794482.html

Abruf: 12.01.2012

[ACE11a] N.N.

Association Auxiliaire de l'Automobile (ACEA)

http://www.acea.be/collection/industry_and_economy_key_figures/

Abruf: 22.01.2012

[ADA11] N.N.

Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.

http://www.adac.de/_mm/pdf/NEFZ-Fahrzyklus_28080.pdf

Abruf: 28.01.2012

[ADL09] WINTERHOFF, M., KAHNER, C., ULRICH, C.

Zukunft der Mobilität 2020 – Die Automobilindustrie im Umbruch?

Arthur D. Little, 2009

[AMS12] N.N.

Auto Motor Sport online

http://www.auto-motor-und-sport.de/fahrberichte/vw-polo-blue-motion-

prototyp-fahrbericht-1324960.html

Abruf: 30.01.2012

[ATZ12a] N.N.

ATZ online

www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/14444/1-4-TSI-Zylinderabschaltung-

im-Vierzylinder.html

Abruf: 20.02.2012

[ATZ12b] N.N.

ATZ online

http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/14500/BMW-will-Abwaerme-

nutzen.html

Abruf: 27.02.2012

[AUD12] N.N.

Audi AG

http://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/effizienz/effizienztechnologien/vdt_category/audi_valvelift_system.html

Abruf: 29.02.2012

[AUD12b] N.N.

Audi AG

http://www.audi.de/etc/medialib/ngw/company/investor_relations/pdf/finanzber ichte/geschaeftsberichte5.Par.0005.File.pdf/kennzahlen_dt.pdf Kennzahlen 2011 Abruf: 05.11.2012

[AUT12] N.N.

Automobile.at

http://www.automobile.at/cgi-bin/deeplink.pl/cgi-

bin/magazin/autonews/Fotoshows/index.pl?id=22233&archiv=shows

Abruf: 04.12.2012

[AWO12a] N.N.

Automobilwoche online

http://www.125jahreauto.com/ausgaben/ausgabe-2/detailseite/eintrag/das-

hightech-puzzle-namens-automobil/

Abruf: 04.01.2012

[AWO12b] N.N.

Automobilwoche online

http://www.automobilwoche.de/article/20120223/REPOSITORY/120229933/1

279/pkw-haltedauer-sinkt

Abruf: 11.04.2012

[BAR09] BARRAND, J., BOKAR, J.

Reducing Tire Rolling Resistance to Save Fuel and Lower Emissions SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst., 2009

[BAU86] BAUER, H.H.

Das Erfahrungskurvenkonzept - Möglichkeiten und Problematik der Ableitung strategischer Handlungsalternativen

Wirtschaftswissenschaftliches Studium, Heft 1, S. 1 -10 (1986)

[BEC08] BECK, E.

Wissenskurven in Theorie und Praxis

Grin Verlag, München, 2008

[BMU09] N.N.

Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂-Emissionen von Personen-

kraftwagen

BMU, Berlin, 2009

[BMW12] N.N.

BMW Group

http://www.bmw.com/com/de/insights/technology/technology_guide/articles/m

m_valvetronic.html

Abruf: 29.02.2012

[BMW12b] BMW Group

http://www.bmwgroup.com/d/nav/index.html?http://www.bmwgroup.com/d/0_0

_www_bmwgroup_com/investor_relations/corporate_news/news/2012/dividen

denmeldung_maerz_2012.html

BMW Corporate News 08.03.2012, Abruf 05.11.2012

[BOR12] N.N.

BorgWarner Turbo Systems

http://www.3k-warner.de/products/turbochargerTechnology.aspx

Abruf: 19.02.2012

[BOS07] DIETSCHE, K.H., KLINGEBIEL, M.

Kraftfahrtechnisches Taschenhandbuch

Herausgeber: Robert Bosch GmbH, 26. Überarbeitete und ergänzte Auflage,

Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007

[BRE06] BREMM, S., ET AL.

Die 2. Generation der Benzin-Direkteinspritzung Aspekte zur Abgasreinigung

und Katalysatorentwicklung

15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2006

[BRU10] BRUECK, R., ET AL.

Der Thermoelektrische Generator zur Reduktion der CO₂-Emissionen-

Rekuperation der Energieverluste im Abgassystem

Emitec Veröffentlichung, 2010

[CUE99] CUENCA, R.M., GAINES, L.L., VYAS, A.D.

Evaluation of Electric Vehicle Produc-tion and Operating Costs

Illinois 1999

[DAI12] N.N.

Daimler AG

https://www.daimler.com/investor-relations/berichte-und-kennzahlen/kennzahlen-geschaeftsfelder

Wichtige Kennzahlen Geschäftsfelder: Mercedes-Benz Cars

Abruf: 05.11.2012

[DAT12] N.N.

DAT-Report

Sonderausgabe 08, 2012

[DBB12] DEUTSCHE BUNDESBANK

http://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Downloads/Statistiken/Geld_Und_Kapitalmaerkte/Zinssaetze_Renditen/S11BATSUHDE.pdf?__blob=publicationFile

MFI-Zinsstatistik (Bestände, Neugeschäft) (abgerufen am 05. Nov. 2012)

[DEL11] N.N.

Delphi

http://delphi.com/manufacturers/auto/powertrain/emissions_standards/2011-2012_delphi_pc/

Abruf: 02.01.2012

[DIE11] N.N.

DieselNet

http://www.dieselnet.com/standards/cycles/jp_jc08.php

Abruf: 07.11.2011

[DKG07] BLÜMER, H., PÜTZ, E.

Zahlen und Fakten

Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe

Bonn, 2007

[DRO12] DRÖEDER, K., GOEDE, M.

Leichtbau Technologie

http://www.leichtbau-technologie.de/karosserie/artikel-leichtbaustrategien-

fuer-zukuenftige-fahrzeuggenerationen.html

Abruf: 02.02.2012

[DTT09] N.N.

A new era, Accelerating toward 2020 - an automotive industry transformed, Deloitte Touche Tohmatsu, 2009

[ECE12] EUROPÄISCHE KOMMISSION

Statistik und Marktbeobachtungsstelle – Öl-Bulletin

http://ec.europa.eu/energy/observatory/oil/bulletin_de.htm

Abruf: 07.11.2012

[ECK10a] ECKSTEIN, L.

Längsdynamik von Kraftfahrzeugen: Verkehrssystem Kraftfahrzeug, Kräfte am Fahrzeug, Antriebstrang, Bremsen, Fahrleistungen und Verbrauch ika, Aachen, 2010

[ECK10b] ECKSTEIN, L.

Unkonventionelle Fahrzeugantriebe ika, Aachen, 2010

[ECK10c] ECKSTEIN, L., GOEBBELS, R., ET AL.

Analyse sekundärer Gewichtseinsparpotenziale in Kraftfahrzeugen ATZ 01/2011

[EEA11] N.N.

European Environment Agency (EEA)

http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-1

Abruf: 22.01.2012

[EES10] N.N.

Technologies and approaches to reducing the fuel consumption of mediumand heavy-duty vehicles

Board on Energy and Environmental Systems, Washington, D.C., 2010

[EPA10a] N.N.

Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards – Final Rule Environmental Protection Agency, 2010

[EPA10b] N.N.

Final Rulemaking to Establish Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards - Joint Technical Support Document

Environmental Protection Agency, 2010

[EPA11a] N.N.

United States Environmental Protection Agency (EPA) http://www.epa.gov/otaq/climate/regulations/420f10014.htm

Abruf: 03.02.2012

[EPA11b] N.N.

United States Environmental Protection Agency (EPA)

http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/1e5ab1124055f3b28525781f0042ed40/6f34c8d6f2b11e5885257822006f60c0!OpenDocument

Abruf: 03.02.2012

[EPA11c] N.N.

United States Environmental Protection Agency (EPA)

http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm

Abruf: 03.02.2012

[EUR07] N.N.

Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Eu-

ropa

Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel, 2007

[EUR09a] N.N.

Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel, 2009

[EUR09b] N.N.

Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel, 2009

[EUR10a] N.N.

Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat und den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss:

Eine europäische Strategie für saubere und energieeffiziente Fahrzeuge Europäische Kommission, Brüssel, 2010

[EUR10b] N.N.

EU energy and transport in figures – Statistical pocketbook 2010 Europäische Kommission, Brüssel, 2010

[EUR10c] N.N.

Bericht der Kommission an das europäische Parlament, den Rat und den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss Europäische Kommission, Brüssel, 2010

[EUR11a] N.N.

Durchführungsverordnung (EU) Nr. 725/2011 der Kommission Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel, 2011

[EUR11b] N.N.

Weissbuch: Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem

Europäische Kommission, Brüssel, 2011

[EUR12] N.N.

Europäische Kommission

http://ec.europa.eu/enterprise/magazine/articles/better-regulation/

article_7009_de.htm Abruf: 17.02.2012

[EUR99] N.N.

Regulation (EEC) No 4064/89 Merger Procedure – Case No COMP/M.1406 - Hyundai / Kia Europäische Komission, Brüssel, 1999

[FEV12a] N.N.

FEV Gasoline Systems Publications

http://www.fev.com/content/public/default.aspx?id=740

Abruf: 20.02.2012

[FEV12b] N.N.

FEV

http://www.fev.com/data/documents/spectrum22_dt.pdf

Abruf: 20.02.2012

[FEV12c] N.N.

Light-Duty Vehicle Technology Cost Analysis – European Vehicle Market (Phase 1), Draft Version FEV, 2012

[FLE05] N.N.

European Database of Vehicle Stock for the Calculation and Forecast of Pollutant and Greenhouse Gases Emissions with TREMOVE and COPERT http://www.e3mlab.ntua.gr/reports/Fleets_Final_Report.pdf Abruf: 01.10.2012

[FOU06] FOUSSIER, P.; MAURICE, P.

From Product Description to Cost: A Practical Approach Springer, Stuttgart, 2006

[FRE12] FREHN, A., ET AL.

Leichtbau Technologie

http://www.leichtbau-technologie.de/artikel/artikel-ganzheitliche-ansaetze.html

Abruf: 02.02.2012

[GER08] GERHARDT, J., ET AL.

Die Rolle des Einspritzsystems bei der Brennverfahrensoptimierung von hochaufgeladenen Pkw-Dieselmotoren

17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2008

[GFE11] N.N.

Global Fuel Economy Initiative (GFEI)

 $http://www.unep.org/transport/gfei/autotool/approaches/information/test_cycle$

s.asp#Japanese

Abruf: 03.02.2012

[HAN11] N.N.

Handelsblatt

http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/porsche-drohen-in-amerika-schwere-strafen/3374700.html?p3374700=all

Abruf: 03.03.2012

[HEI11] N.N.

Heise online

http://www.heise.de/newsticker/meldung/CO2-Ausstoss-Experten-fordern-

Ueberarbeitung-des-Fahrzyklus-1274574.html

Abruf: 01.03.2012

[HEI12] N.N.

Heise online

http://www.heise.de/autos/artikel/Druck-Erzeugnis-Hubraum-ist-doch-zu-

ersetzen-457002.html

Abruf: 18.02.12

[HIL12] HILLEBRECHT, M., ET AL.

Leichtbau Technologie

http://www.leichtbau-technologie.de/karosserie/artikel-leichtbau-durch-kluge-

materialauswahl-und-bauweise.html

Abruf: 02.02.2012

[HOL04] HOLWEG, M., PIL, F.K.

The Second Century. Reconnecting Customer and Value Chain through Build-to-Order. Moving beyond Mass and Lean Production in the Auto Industry

The MIT Press, Cambridge, 2004

[HOR07] HORN, M., ET AL.

Fahrwiderstände und Energieeffizienz in: CO2 – Die Herausforderung für unsere Zukunft ATZ/MTZ Energie 2007, München

[HUC07] HUCHO, H.

Luftwiderstand – eine Halbierung des cw-Wertes erscheint möglich 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2007

[ICC07] GORDON, D., ET AL.

Passenger Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards: A Global Update The International Council on Clean Transportation, Washington, 2007

[ICC11a] N.N.

Global Light-duty Vehicles: Fuel Economy and Greenhouse Gas Emissions Standards – April 2011 Update International Council on Clean Transportation, Washington, 2011

[ICC11b] N.N.

International Council on Clean Transportation (ICCT) http://www.theicct.org/info/data/GlobalPVStd_Aug2011_datasheet_web.xls Abruf: 08.01.2012

[ICC11c] N.N.

Global Comparison of Light-Duty Vehicle: Fuel Economy/GHG Emissions Standards – Update: August 2011 International Council on Clean Transportation, Washington, 2011

[ICC11d] CAMPESTRINI, M., MOCK, P.

European Vehicle Market Statistics International Council on Clean Transportation, Washington, 2011

[IEA12] N.N.

World Energy Outlook 2012 International Energy Agency, Paris, 2012

[JRC07] N.N.

Well-to wheel analysis of future fuels and powertrains in the European context Europäische Kommission – Joint Research Centre, Brüssel, 2007

[JRC10] JULIUSSEN, E., ROBINSON, R.

Is Europe in the Driver's Seat? The Competitiveness of the European Automotive Embedded Systems Industry

JRC Scientific and Technical Reports, Sevilla, Spanien, 2010

[KBA11] N.N.

Neuzulassungsstatistik 2010 Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Flensburg, 2011

[KBA12] N.N.

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) online

http://www.kba.de/cln_031/nn_212378/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Segmen-

te/2010__b__segmente__kompakt__pdf,templateId=raw,property=publication File.pdf/2010_b_segmente_kompakt_pdf.pdf Abruf: 08.01.2012

[KOR08] KORTE, V., ET AL.

Downsizing am Beispiel eines 1,2 l 3-Zylindermotors 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2008

[KUN11] KUNERT, U., RADKE, S.

Kraftfahrzeugverkehr 2010

Weiteres Wachstum und hohe Bedeutung von Firmenwagen DIW Wochenbericht Nr. 48, 2011

[LAN07] LANG, O., ET AL.

Potenziale des strahlgeführten Brennverfahrens in Kombination mit Aufladung 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2007

[LAU09] LAUE, T., ET AL.

Optimierung von Leichtbau und Energieeffizienz zur nachhaltigen CO₂-Reduktion

18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2009

[LEO11] LEOHOLD, J.

Chancen und Grenzen für einen nachhaltigen FVK-Einsatz im Automobil CCeV Automotive Forum, Ingolstadt, 2011

[LÖF11] LÖFFLER, C.

Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung Jost-Jetter-Verlag, Heimsheim, 2011

[MCK12] ANNWALL, B., BÄRLUND, A., FRIBERG, R., ET AL.

Maximizing bottom-line impact through transaction-level margin management. McKinsey Report: Advanced Marketing and Sales for Advanced Industries, 2012

[MOC10] MOCK, P.

Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO2-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21) DLR, Stuttgart. 2010

[MOT12] N.N.

Motorlexikon

http://www.motorlexikon.de/index.php4

Abruf: 12.02.2012

[MUE07] MUELLER, R., ET AL.

Reduzierung der CO₂-Emissionen eines Turbo-DI-Ottomotors durch gekühlte AGR und optimierte Regelung des Kühlsystems
16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2007

[NHA11] N.N.

National Highway and Safety Administration http://www.nhtsa.gov/cars/rules/cafe/overview.htm Abruf: 03.11.2011

[NPE11] N.N.

Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität – Anhang VerfasserNationale Plattform Elektromobilität (NPE), Berlin, 2011

[PEW11] N.N.

Pew Center on Global Climate Change http://www.pewclimate.org/federal/executive/vehicle-standards/ Abruf: 18.01.2012

[PET06] PETERS, A., HAAN, P.

Der Autokäufer – seine Charakteristika und Präferenzen. Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts "Entscheidungsfaktoren beim Kauf treibstoff-effizienter Neuwagen"

Berichte zum Schweizer Autokaufverhalten Nr. 11, Zürich, 2006

[PFA11] PFALLER, S., ET AL.

Intelligentes Energiemanagement und effizienter Generator ATZ – Der neue Audi A6 Ausgabe Nr.: 2011-01

[PRE11] PREUSSLER, S., ET AL.

LED-Vollscheinwerfer mit adaptivem Fernlicht

ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe Nr.: 2011-01

[REI10] REIF, K.

Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe Viewer+Teubner, Wiesbaden, 2010

[RIC11] N.N.

Project report: computer simulation of light-duty vehicle technologies for greenhouse gas emission reduction in the 2020-2025 timeframe Ricardo, 2011

[RIC12] N.N.

Project report: analysis of greenhouse gas emission reduction potential of light duty vehicle technologies in the european union for 2020–2025 Ricardo, 2012

[ROG62] ROGERS, E.

Diffusion of innovations

Glencoe, 1962

[SCH09] SCHULTE, H.

Der industrielle Entwicklungsprozess von Pkw-Antriebssystemen Vorlesungsskript RWTH Aachen und Ford-Werke GmbH, Aachen, 2009

[SCL10] SCHLESINGER M., ET AL.

Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung Prognos AG, EWI und GWS, Basel/Köln/Osnabrück, August 2010

[SHA10] SHARPE, R.

EU Transport GHG: Routes to 2050? European Comission, Brüssel, 2010

[SHE09] N.N.

Shell Pkw-Szenarien bis 2030: Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität
Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg, 2009

[STE11] N.N.

Stern online

http://wap.stern.de/op/stern/de/ct/-X/detail/panorama/Autoh%E4ndler-

Abwrackpr%E4mie-Wirkung/652304/

Abruf: 15.01.2012

[TAE11] N.N.

How clean are Europe's cars? An analysis of carmaker progress towards EU CO₂-targets in 2010

T&E – European Federation for Transport and Environment, Brüssel, 2011

[TIM08] TIMM, H.

Karosseriewerkstoffe der Zukunft

Aachener Karosserietage 2008, Aachen, 2008

[TOS12] N.N.

Internetauftritt Toshiba

http://de.computers.toshiba-europe.com/innovation/generic/environment-

greening-of-products/#Product-Info

Abruf: 27.04.2012

[TOY12] N.N.

Toyota

http://www.toyota-global.com/investors/financial_data/high-light.html Financial Highlights, Abruf 05.11.2012

[TNO11] N.N.

Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO₂ emissions from cars

TNO, Delft (Niederlande), 2011

[TÜV05] STEVEN, H.

Untersuchungen für eine Änderung der EU Direktive 93/116/EC

TÜV Nord Mobilität GmbH & Co. KG, Würselen, 2005

[VCD08] N.N.

VCD Hintergrundpapier: CO₂-Grenzwerte für Pkw

Verkehrsclub Deutschland e.V., Berlin, 2008

[VOL09] N.N.

Effizient unterwegs – Hintergrundwissen für Spritsparprofis

Volkswagen AG Konzernforschung Umwelt Produkt, Wolfsburg, 2009

[VOL12a] N.N.

Volkswagen Classic

http://www.volkswagen-classic.de/modelle

Abruf: 04.01.2012

[VOL12b] N.N.

Volkswagen

http://www.volkswagen.de/de/Volkswagen/nachhaltigkeit/technologien/forschung und projekte/1-liter-auto.html

Abruf: 31.01.2012

[VOL12c] N.N.

Volkswagen

http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/publications/201 2/03/Volkswagen_AG_Annual_Report_2011.bin.html/binarystorageitem/file/Y _2011_d.pdf

Volkswagen AG Geschäftsbericht 2011, Abruf: 05.11.2012

[WAL11] WALLENTOWITZ, H., FREIALDENHOVEN, A., OLSCHEWSKI, I.

Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges – Technologien, Märkte und Implikationen

Vieweg+Teubner, Aachen, 2011

[WEI12] WEISS, M., PATEL, M., JUNGINGER, M., ET AL.

On the electrification of road transport - Learning rates and price forecasts for hybrid-electric and battery-electric vehicles

Energy Policy, 48, S. 374 - 393 (2012)

[WRI36] WRIGHT, T.

Factors Affecting the Cost of Airplanes

Journal of Aeronautical Sciences, Vol. 3, S. 122 - 128 (1936)

[ZEI11] N.N.

Zeit online

http://www.zeit.de/auto/2010-11/plug-in-verbrauchsangaben/seite-1

Abruf: 28.01.2012

[ZFF11] N.N.

ZF entwickelt 9-Gang-Automatgetriebe für Pkw

Presseinformation ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen, 2011

[ZÄP00] ZÄPFEL, G.

Strategisches Produktionsmanagement Oldenbourg Verlag, München, 2000

12 Anhang A: Technologiebeschreibung

In diesem Kapitel werden Technologien zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Pkw identifiziert und resultierende CO₂-Reduzierungspotenziale, Technologiekosten und Gewichtsänderungen ermittelt. Außerdem wird der Zeithorizont bis zur möglichen Verfügbarkeit dieser Technologie im europäischen Fahrzeugmarkt abgeschätzt.

In einem ersten Schritt werden für jedes der konsolidierten europäischen Fahrzeugsegmente auf Basis einer Marktanalyse fiktive Referenzfahrzeuge definiert, welche eine Basis zur Anrechnung der identifizierten CO₂-Reduzierungspotenziale bilden. Diese Referenzfahrzeuge spiegeln näherungsweise den technologischen Durchschnitt der konsolidierten Segmente wider und bilden somit den Ausgangspunkt zur Abschätzung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen für die europäische Neuzulassungsflotte in 2020.

Zur Vorbereitung der folgenden Analyse werden dann die möglichen Ansatzpunkte zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Pkw bestimmt und diskutiert. Dabei wird eine grundlegende Unterteilung in Technologien vorgenommen, welche die Effizienz der Bereitstellung der Antriebsenergie erhöhen und solche, welche die zur Fahrzeugbewegung benötigte Energie durch eine Reduzierung der Fahrwiderstände senken. Dies ermöglicht eine fundierte Bewertung der Technologien auf Grundlage der Referenzfahrzeuge.

Basierend auf dieser Unterteilung und den grundlegenden Wirkzusammenhängen werden schließlich Technologien zur CO₂-Reduzierung identifiziert, beschrieben und ihr Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen erläutert. Maßnahmen, die sich nicht unmittelbar in eine Kategorie einordnen lassen, werden unter sonstigen Maßnahmen zusammengefasst. Die in den Technologiebeschreibungen genannten CO₂-Reduzierungspotenziale, Kosten und Gewichtsänderungen geben die Bandbreite über den drei konsolidierten Segmenten an und ergeben sich als bewertete Aggregation verschiedener Quellen insb. [TNO11][EPA10b][MOC10][RIC11][RIC12][FEV12c]. Schließlich werden diese Kennzahlen detailliert nach Segmenten in einer tabellarischen Übersicht aggregiert und das Vorgehen zur Ermittlung der Daten zusammengefasst.

Die im Folgenden aufgeführten Einsparpotenziale für CO₂-Emissionen beziehen sich, falls nicht explizit erwähnt, auf die messbaren Emissionseinsparungen im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Als Technologiekosten-Basis wurden Herstellkosten bei Annahme einer Volumenproduktion im Jahr 2020 gewählt. Diese umfassen hier neben direkten Kosten wie Material und Lohnkosten auch einen Anteil indirekter Kosten, z.B. Kosten der Forschung und Entwicklung. Die aufgeführten Technologiekosten berücksichtigen dabei weitere Einflussfaktoren, z.B. Lernkurveneffekte oder Technologiekomplexität.

12.1 Referenzfahrzeuge

In der Literatur erfolgt die Angabe von Einsparpotenzialen und Kosten meist in Bezug auf ein Referenzfahrzeug, welches sich je nach Quelle unterscheidet. Zur Normierung und Anrechnung der identifizierten Potenziale werden Referenzfahrzeuge für die europäische Fahrzeugflotte in 2010 definiert. Es wird jeweils ein Benzin- und Dieselfahrzeug für jedes der drei konsolidierten Fahrzeugsegment festgelegt, mit dem Ziel, die hohe Komplexität des heterogenen europäischen Fahrzeugmarktes zu reduzieren. Zur validen Abschätzung der CO₂-Flottenemissionen in 2020, werden diese Fahrzeug-Referenzen so gewählt werden, dass sie möglichst gut die europäische Fahrzeugflotte repräsentierten.

Abb. 12-1 zeigt die definierten Referenzfahrzeuge sowie entsprechende technische Kennzahlen, die bei der Normierung der CO₂-Reduzierungspotenziale berücksichtigt werden. Dabei wird aufgrund der technologischen Unterschiede zwischen Benzin- und Diesel-Referenzfahrzeugen differenziert. Die Fahrzeuge wurden auf Grundlage der Auswertung der europäischen Marktdaten der EEA definiert. Darüber hinaus wurden Statistiken des ICCT verwendet und durch eigene Marktrecherchen ergänzt. Nicht explizit aufgeführt sind alternative Antriebskonzepte wie Erdgas- und Flüssiggasfahrzeuge sowie Elektrofahrzeuge. Diese werden im Rahmen von Szenario-Annahmen für 2020 separat betrachtet.

In den drei konsolidierten Segmenten konnten signifikante Überschneidungen verschiedener Fahrzeugeigenschaften festgestellt werden, z.B. Hubraumgröße, Zylinderanzahl, Antriebsleistung, Getriebe oder Kraftstoffeinspritzung. Diese Referenzfahrzeuge sollen den Durchschnitt des jeweiligen konsolidierten Segments und unter Berücksichtigung der Marktanteile die gesamte europäische Fahrzeugflotte repräsentieren. Informationen zur zeitlichen Entwicklung technischer Parameter nach Fahrzeugsegmenten, z.B. der Zylinderanzahl oder Hubraumgröße, sind im Anhang in Abb. 13-5 bis Abb. 13-10 zu finden.

Segment	Markt- anteil 2010*	Anteil im SEG	Kraftstoff	Gewicht [kg]	Verbrauch [l/100km]	CO ₂ [g/km]	Hubraum [l]	Motor	DI	Getriebe	Leistung [kW]
SEG-1 (A,B)	36 %	69 %	Benzin	1.067	5,4	127	1,2	4-Zylinder	-	Manuell, 5-G.	60
		31 %	Diesel	1.194	4,1	111	1,4	4-Zylinder	х	Manuell, 5-G.	60
SEG-2 (C,D,M,J)	57 %	33 %	Benzin	1.396	6,8	159	1,6	4-Zylinder	-	Manuell, 6-G.	90
		67 %	Diesel	1.573	5,4	145	2,0	4-Zylinder	х	Manuell, 6-G.	90
SEG-3 (E,F,S)	4 %	25 %	Benzin	1.635	9,1	213	2,8	6-Zylinder	х	Automatik, 6-Gang	170
		75 %	Diesel	1.795	6,1	164	3,0	6-Zylinder	х	Automatik, 6-Gang	170

^{*} Drei Prozent der Neuzulassungen mit "Sonstigen Antrieben" (u.a. Erdgas/Flüssiggas) werden anhand von Szenario-Annahmen getrennt betrachtet

Abb. 12-1: Technische Spezifikationen der Referenzfahrzeuge für die europäischen Neuzulassungsflotte 2010 [Datenbasis: [EEA11][ICC11d]]

12.2 Hebel zur Reduzierung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen

In diesem Kapitel werden die möglichen Ansatzpunkte zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen untersucht. Die Wirkzusammenhänge zwischen CO₂-

Emissionen und den beeinflussbaren Fahrzeugparametern unterstützen dabei, die Potenziale einzelner technischer Maßnahmen verstehen und bewerten zu können. Die grundsätzlichen Stellhebel zur Reduzierung von Emissionen und Verbrauch lassen sich anhand elementarer Formeln der Längsdynamik von Kraftfahrzeugen beschreiben.

Die Gl. 4-1 und Abb. 12-2 zeigen das Kräftegleichgewicht zwischen Antrieb und Fahrwiderständen. Dies beschreibt, dass ein Fahrzeug zur Überwältigung der Fahrwiderstände ein Kraftangebot an den Rädern liefern muss, welches den am äußeren Fahrzeug angreifenden Kräften entspricht. Es wird deutlich, dass der Energieverbrauch eines Kraftfahrzeugs und die damit in Zusammenhang stehenden CO₂-Emissionen durch zwei Hebel, die Bereitstellung des Kraftangebots und die Optimierung des Kraftbedarfs, reduziert werden können [BOS07] [ECK10a].

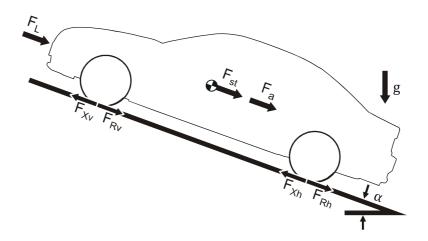


Abb. 12-2: Kräftegleichgewicht am Kraftfahrzeug [In Anlehnung an ECK10a]]

 $\begin{aligned} &\text{Kraftangebot} = \text{Kraftbedarf} & &\text{Gl. 4-1} \\ &F_{x} = F_{R} + F_{ST} + F_{a} + F_{L} \\ &= m \cdot g \cdot f_{R} \cdot cos\alpha + m \cdot g \cdot sin\alpha + e_{i} \cdot m \cdot a + c_{w} \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^{2} \end{aligned}$

F_R: Rollwiderstand F_{sr}: Steigungswiderstand F_a: Beschleunigungswiderstand

F_L: Luftwiderstand m: Fahrzeugmasse g: Erdbeschleunigung

f_R: Rollwiderstandsbeiwert α: Steigungswinkel e_i: Massenfaktor

a: Fzg.-Beschleunigung A: Stirnfläche cw: Luftwiderstandsbeiwert

p: Luftdichte v: Geschwindigkeit

So besteht einerseits die Möglichkeit, über eine effizientere Bereitstellung des Kraftangebots Einfluss auf die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch zu nehmen. Dazu muss die Effizienz der Energieumwandlung von der chemischen Energie des Kraftstoffes in mechanische Antriebsenergie verbessert werden. Außerdem müssen auftretende Verluste bei der Kraft-übertragung zwischen Antriebsaggregat und Antriebsrädern minimiert werden [BOS07].

Als zweiter Ansatzpunkt lässt sich der zur Bewältigung der Fahraufgabe benötigten Kraftbedarf reduzieren. Dieser ergibt sich aus der Summe der am Fahrzeug angreifenden äußeren Fahrwiderstände F_R , F_{ST} , F_a und F_L .

Grundsätzlich umfasst der Widerstand der Fahrzeugräder alle am Rad auftretenden Kräfte und setzt sich aus Anteilen des Reifens, der Fahrbahn und des Schräglaufs zusammen. Bei Geradeausfahrt und trockener Fahrbahn kann der Widerstand der Fahrzeugräder mit dem sogenannten Rollwiderstand F_R nach Gl. 4-1 angenähert werden. Der Rollwiderstand kann durch Reduzierung der Fahrzeugmasse m und einen verringerten Rollwiderstandsbeiwert f_R gesenkt werden [ECK10a].

Bei Beschleunigungsvorgängen muss der Beschleunigungswiderstand in Form von Massenträgheiten überwunden werden. Dabei kann man zwischen der translatorischen Beschleunigung der Fahrzeugmasse und der rotatorischen Beschleunigung der drehenden Massen des Fahrzeugantriebs unterscheiden. Zu dem rotatorischen Anteil tragen neben den Rädern auch die verbundenen Wellen, das Getriebe, die Kupplungen und Teile des Motors bei. In der Formel wird dieser rotatorische Anteil aggregiert über den Massenfaktor ei berücksichtigt. In diesem Massenfaktor werden die rotatorischen Anteile als Aufschlag auf die translatorisch zu beschleunigenden Fahrzeugmasse dargestellt. Neben der Reduzierung des Massenfaktors über eine Trägheitsmomenten- und Drehzahlreduzierung rotierender Massen, kann der Beschleunigungswiderstand vordergründig durch eine Verringerung der Fahrzeugmasse gesenkt werden. Auch der Steigungswiderstand F_{ST} profitiert von einer Reduzierung der Fahrzeugmasse. Allerdings muss betont werden, dass der Steigungswiderstand insbesondere im Praxisbetrieb eine Rolle spielt und keine Relevanz für die Verbrauchswerte- und Emissionswerte im NEFZ aufweist [ECK10a].

Der Luftwiderstand kann dagegen durch eine Reduzierung des Produkts aus Stirnfläche A und Luftwiderstandsbeiwert c_w gesenkt werden. Dieser beschreibt die Um- und Durchströmung des Fahrzeugs und kann durch die Gestaltung der Fahrzeugform beeinflusst werden. Die Luftdichte unterliegt dagegen lokalen Schwankungen und kann, ebenso wie die Fahrzeuggeschwindigkeit, nicht konstruktiv beeinflusst werden. Da die Stirnfläche in der Regel über die Fahrzeuganwendung vorgegeben ist, lässt sich über den Parameter c_w am besten Einfluss nehmen.

Zusätzlich lässt sich aus Gl. 4-1 ablesen, dass bei häufigen und starken Beschleunigungsvorgängen, also bei einem hohen Anteil des Beschleunigungswiderstands an der Bedarfskraft, vor allem die Masse ein entscheidender Faktor ist. Bei hohen Geschwindigkeiten macht dagegen der Luftwiderstand einen wesentlichen Anteil der Bedarfskraft aus, da dieser mit der Geschwindigkeit im Quadrat steigt [ECK10a]. Abb. 12-3 zeigt die äußeren Fahrwiderstandsanteile für einzelne Fahrzeugsegmente bei einer Fahrt im NEFZ anhand von Simulationsergebnissen.

Dabei wird deutlich, dass vor allem bei schwereren Fahrzeugen der Beschleunigungswiderstand einen hohen Anteil an der Bedarfskraft im NEFZ hat. Dagegen nimmt bei kleineren

Fahrzeugen der Luftwiderstand einen größeren Anteil ein. Der Rollwiderstand ist über die Segmente hinweg der geringste Widerstandsanteil, wohingegen der Beschleunigungswiderstand mehrheitlich den größten Anteil ausmacht.

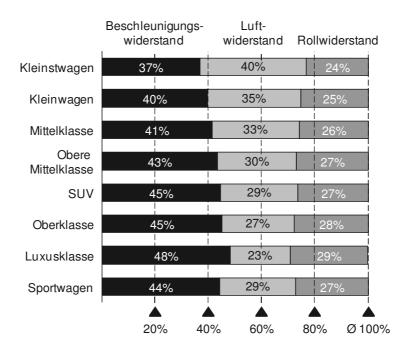


Abb. 12-3: Relative Aufteilung der Fahrwiderstände bei verschiedenen Fahrzeugsegmenten im NEFZ [HOR07]

Eine Änderung des Fahrzyklus, z.B. eine Erhöhung der Höchstgeschwindigkeit oder des Beschleunigungsmusters, würde die Gewichtung der Widerstandsanteile signifikant verändern und damit auch die Wirksamkeit von entsprechenden Maßnahmen im Zyklus-Kontext.

Im Folgenden werden zuerst konkrete Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs behandelt, um anschließend Technologien zur Effizienzsteigerung des Fahrzeugantriebs zu erläutern.

12.3 Reduzierung des Energiebedarfs zum Fahrzeugbetrieb

Die Betrachtung der Längsdynamik von Kraftfahrzeugen ergab, dass der Energiebedarf zum Fahrzeugbetrieb im Wesentlichen durch drei Parameter bestimmt wird. So reduziert eine Senkung der Fahrzeugmasse m durch Leichtbau den Beschleunigungswiderstand und den Rollwiderstand. Eine Reduzierung des Rollwiderstandsbeiwerts f_R senkt ebenfalls den Rollwiderstand. Der Luftwiderstand kann über eine aerodynamische Optimierung der Fahrzeugform über den c_w-Wert verringert werden. Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs werden im Folgenden detailliert beschreiben.

12.3.1 Rollwiderstandsreduzierte Reifen

Der Rollwiderstand eines Reifens wird im Wesentlichen durch seine viskoelastischen Eigenschaften verursacht. Während des Abrollens kommt es zu Verformungen, wobei Energie in Form von Wärme verloren geht. Zu den dabei auftretenden Mechanismen zählen Biegung, Stauchung und Scherung, siehe Abb. 12-4.

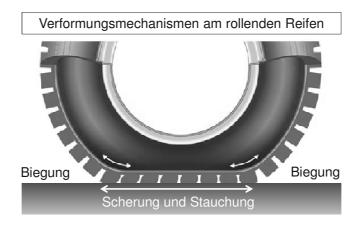


Abb. 12-4: Rollwiderstand durch Verformung des Reifens [BAR09]

Über eine Optimierung des Reifens können diese Verluste reduziert und somit der Rollwiderstand gesenkt werden, was einer Absenkung des Rollwiderstandsbeiwerts f nach Gl. 4-1 entspricht [RIC11].

Hierbei bieten die Reifenkonstruktion, Profilgestaltung sowie die Materialmischung Ansatzpunkte zur Absenkung des Rollwiderstands zwischen Reifen und Fahrbahn. Dabei müssen jedoch eine Vielzahl von Zielkonflikten berücksichtigt werden. Hierzu zählen Eigenschaften wie Sicherheit, Haltbarkeit oder Abrollgeräusche [BOS07]. Reifen die insbesondere im Hinblick auf den Rollwiderstand optimiert wurden, werden auch als Leichtlaufreifen bezeichnet.

Neben dem Reifen selbst hat jedoch auch der Reifendruck einen signifikanten Einfluss auf die Verformung und damit den Rollwiderstand [SHA10]. Ein Reifen kann pro Monat zwischen 3 und 6 % an Luft verlieren, ohne dass der Fahrer dies unmittelbar bemerkt. Der resultierende zu niedrige Reifendruck kann den CO₂-Ausstoß bei verringerter Lebensdauer um bis zu 4 % erhöhen. Eine Maßnahme zur Unterstützung des Fahrers ist ein Reifendrucküberwachungssystem, welches den Fahrer vor zu niedrigem Reifendruck warnt [EUR12].

In Europa wurde 2009 mit der Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates eine Richtlinie eingeführt, welche Reifendrucküberwachungssysteme und Grenzwerte für den Rollwiderstand vorschreibt. Zusätzlich werden in dieser Verordnung auch Grenzwerte für Abrollgeräusche und Nasshaftung vorgeschrieben, so dass ein Effizienzgewinn die Sicherheit und den Komfort nicht belastet. Die Verordnung (EG) Nr. 661/2009 gilt für neu typisierte Modellen ab 2012 und für alle Neufahrzeuge ab 2014 [EUR09b]. Es ist ge-

plant diese Grenzwerte bezüglich des Rollwiderstands 2017 für neu typisierte Fahrzeuge bzw. 2018 für Neufahrzeuge weiter zu verschärfen [EUR10c].

Auf dem Prüfstand im NEFZ messbar ist lediglich die CO₂-reduzierende Wirkung von Leichtlaufreifen. Hierfür wird zu Kosten zwischen 25 € und 40 € ein Potenzial von 2 % angesetzt. Reifendruckkontrollsysteme können ihre Vorteile dagegen nur im Praxis-Betreib ausspielen. An dieser Stelle kann kritisch angemerkt werden, dass Leichtlaufreifen zu einer Einsparung im NEFZ führen und gleichzeitig, wie auch die Reifendrucküberwachung, als Teil der 10 g CO₂/km-Regelung nach dem integrierten Ansatzes der europäischen CO₂-Gesetzgebung aufgezählt werden. Leichtlaufreifen werden somit in gewisser Hinsicht doppelt angerechnet.

12.3.2 Leichtbau

Leichtbau beschreibt Maßnahmen zur Reduzierung des Fahrzeuggewichts bei Beachtung einer hinreichenden Steifigkeit, dynamischer Stabilität und Festigkeit. Dabei wird langfristig das Ziel angestrebt, Konzepte zu entwickeln, welche unter den Kriterien Gewicht, Kosten, Stückzahl und Funktion die ideale Eigenschaftskombination erreichen [LAU09][DRO12].

Das durchschnittliche Fahrzeuggewicht hat in der Vergangenheit in den meisten Fahrzeugsegmenten stetig zugenommen. So wog ein Golf I um 1980 noch 800 kg und der aktuelle Golf VI bereits um 1.200 kg. Die Ursache hierfür sind u.a. gestiegene Anforderungen an die Fahrzeugtechnik in den Bereichen Interieur, Sicherheit, Qualität, Komfort und Gesetzgebung sowie ein deutlicher Größenzuwachs. Erhöhte Crashanforderung in der passiven Sicherheit oder verschärfende Schadstoffgrenzwerte führen zu einer Gewichtserhöhung, da zusätzliche Komponenten oder Material benötigt werden. Der Kunde wünscht sich außerdem einen höheren Komfort, eine höhere Motorleistung und mehr Platz, was ebenfalls eine Erhöhung des Fahrzeuggewichts zur Folge hat [LEO11]. Die durchschnittliche Gewichtsverteilung im heutigen Fahrzeug stellt sich entsprechend Abb. 12-5 dar.

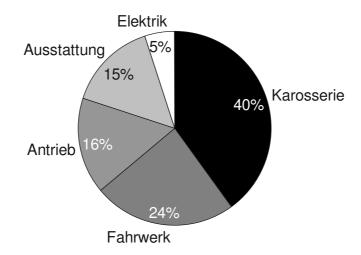


Abb. 12-5: Gewichtsverteilung im Fahrzeug [In Anlehnung an [LEO11]]

In jedem dieser Bereiche werden Leichtbaumaßnahmen vorangetrieben. Den größten Hebel bietet mit einem Anteil von ca. 40 % die Fahrzeug-Karosserie.

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Leichtbau unterscheiden, siehe Abb. 12-6. Beim stofflichen Leichtbau wird der bisher eingesetzte Stahl durch Werkstoffe mit einer höheren spezifischen Festigkeit substituiert. Zu diesen Werkstoffen gehören neben Stählen mit höheren Festigkeiten, Aluminium, faserverstärkte Kunststoffe (FVK) und Magnesium. Bei einer Kombination verschiedener Werkstoffe spricht man von einer Multi-Material-Bauweise. Fortschritte sind hier in Zukunft vor allem von der Prozess- und Fertigungstechnik, insbesondere im Bereich der Fügetechnik, abhängig [RIC11] [DRO12].

Beim konstruktiven Leichtbau wird dagegen die Fahrzeugkonstruktion mitsamt der beinhalteten Systeme und Komponenten beanspruchungsgerecht optimiert, z.B. indem Bauteile integriert oder Wanddicken reduziert werden. Letzteres kann u.a. über die Methodik der Topologieoptimierung erreicht werden, bei der die Materialverteilung in einem Bauraum unter vorgegebenen Lastfällen optimiert wird. Während beim stofflichen Leichtbau tendenziell zusätzliche Kosten entstehen, kann konstruktiver Leichtbau über Materialeinsparungen sogar zu einer Kostenreduzierung in der Herstellung führen [RIC11][HIL12].

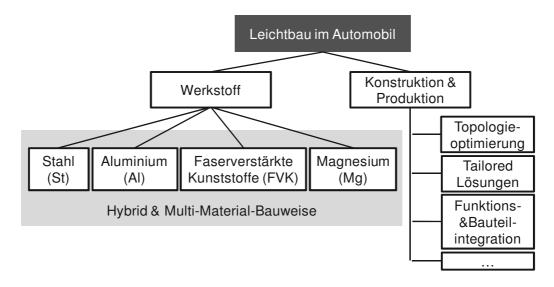


Abb. 12-6: Stofflicher und konstruktiver Leichtbau im Automobil [Eigene Darstellung]

Ein Beispiel dafür, dass moderne Stahlgüten und maßgeschneiderte Stahllösungen das Fahrzeuggewicht noch weiter reduzieren können, sind z.B. Tailored Blanks. Hierbei wird eine Blechplatine aus verschiedenen Blechdicken und Werkstoffgüten beanspruchungsgerecht zusammengesetzt. Durch den Einsatz von Aluminium kann die Karosserie-Masse gegenüber reiner Stahlbauweise sogar um ca. 40 % gesenkt werden. Mit der Space-Frame Bauweise von Audi (ASF), einer selbsttragenden Aluminiumkarosserie, begann bereits in 1994 die Verwendung von Aluminium als Werkstoff im Karosseriebau. Faserverstärkte Kunstoffe (FVK) sind für Strukturbauteile bisher nur selten in der Großserie zu finden. Sie bieten jedoch in Form von Carbon-Faserverstärktem-Kunststoff (CFK) ein signifikantes Leichtbaupotenzial, welches theoretisch 20 % bis 40 % Gewichtsreduktion im Vergleich zur Aluminium Bauweise

bietet. Der Einsatz von CFK erfolgt aufgrund der hohen Kosten bisher vorwiegend im Rennsportbereich oder durch Anbauteile im Sichtbereich in Kleinserie [DRO12][LEO11].

Abb. 12-7 zeigt qualitativ die Leichtbaupotenziale verschiedener Werkstoffe über ihrer Stückzahlfähigkeit sowie die entsprechenden Kosten. Es ist zu erkennen, dass mit dem Einsatz von neuen Materialen, z.B. Aluminium und Kunststoffen, Kostensteigerungen verbunden sind. Während sich in naher Zukunft in der Großserie vor allem optimierte Stahlbauweisen durch konstruktive Verbesserung und hochfeste Stähle eignen, bieten Multi-Material-Bauweisen langfristig erhebliche Möglichkeiten zur weiteren Gewichtsreduzierung. Erfahrung hierfür wird vor allem aus dem Einsatz von Aluminium und Kunststoffbauweisen im Bereich von Kleinserien und im Premiumsegment gewonnen. Über das Leichtbaupotenzial hinaus ermöglicht die Anwendung von FVK auch eine komplexere Geometrie und einen höheren Integrationsgrad als klassische Metallbauweisen. Der Trend für zukünftige Leichtbaukonzepte geht allerdings hin zu intelligenten Multi-Material-Bauweisen, bei dem das richtige Material an der richtigen Stelle eingesetzt wird.

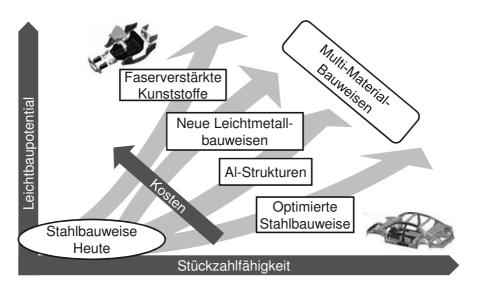


Abb. 12-7: Übersicht über die qualitativen Leichtbaupotenziale und die Stückzahlfähigkeit von Leichtbaumaterialien [In Anlehnung an [DRO12]]

Das erreichbare Potenzial mit Hilfe einer Multi-Material-Bauweise veranschaulicht die 2009 vorgestellte Karosseriestruktur des SuperLightCar-Projektes (SLC), bei dem 53 % Aluminium, 36 % Stahl, 7 % Magnesium und 4 % FVK eingesetzt wurden. Gegenüber einer Referenzstruktur eines Golf V aus Stahl wurde unter vertretbaren Mehrkosten eine Gewichtsreduzierung um 180 kg bzw. 35 % erreicht, wobei die Anforderungen hinsichtlich Crashsicherheit, Steifigkeit sowie Fertigungspraktikabilität berücksichtigt wurden [DRO12].

Neben den beschriebenen Leichtbauweisen im Bereich der Karosserie findet Leichtbau auch im gesamten Antriebsstrang, im Fahrwerk sowie bei Anbauteilen statt [FRE12]. Die konkreten Handlungsfelder für die Forschung und Entwicklung im Bereich des Leichtbaus liegen vor

allem bei der Kostenreduzierung der Werkstoffe und Fertigungsverfahren sowie deren Befähigung zur Großserie [LEO11][DRO12].

Als Faustformel gilt, dass pro 100 kg Gewichtseinsparung bis zu 8,8 g CO₂/km an CO₂ im NEFZ eingespart werden können [TIM08]. Das Potenzial zur sekundären Gewichtsreduktion im Kraftfahrzeuge wird auf sogar bis zu 30 % abgeschätzt [ECK10c]. Hierbei wird eine funktionsgerechte Leistungs- und Konstruktionsanpassung an das niedrigere Gewicht konsequent durchgeführt. Die Fahrdynamik des Fahrzeugs, Zuladung und Sicherheit sollen dabei jedoch stets konstant bleiben.

Zur Erzielung von positiven Effekten durch Leichtbau für die Einhaltung der CO₂-Grenzwerte müssen die Hersteller das gesamte Potenzial des Leichtbaus über auch Sekundäreffekte ausschöpfen um damit mindestens CO₂-Einsparungen von mehr als 4,57 g CO₂/km pro 100 kg Gewichtsreduzierung zu erzielen. Davon unberührt bleibt naturgemäß der Nutzen für den Kunden, welcher durch effizienten Leichtbau von der vollen Einsparung der CO₂-Emissionen bzw. des Kraftstoffverbrauchs profitiert.

Für die Analyse wird eine dreistufige Gewichtsreduzierung an der Karosserie von 2 %, 7 % und 12 % angesetzt. Diese führt zu CO₂-Einsparungen von 1,5 %, 5 % und 9 %, wobei abhängig vom Segment und der Gewichtsreduzierung Kosten zwischen 130 € und 1.200 € anfallen können. Der Leichtbau außerhalb der Karosserie wird anhand einer Gewichtsreduzierung von Komponenten in Höhe von 1 % zu Kosten zwischen 120 € und 180 € berücksichtigt. Dies hat CO₂-Einsparungen von 1,5 % zur Folge.

12.3.3 Aerodynamische Optimierung

Die Aerodynamik befasst sich mit allen Um- und Durchströmungsvorgängen am Fahrzeug. Diese Strömungen können auf Fahrzeugfunktionen und -eigenschaften Einfluss nehmen, was bei der Gestaltung der Fahrzeugform berücksichtigt werden muss. Dazu zählen neben dem Kraftstoffverbrauch bzw. der CO₂-Emissionen auch die Fahrstabilität, Windgeräusche, Verschmutzung der Außenhaut, Komfort oder die Kühlung von Betriebsstoffen und Bauteilen [BOS07]. Das für eine Reduzierung der CO₂-Emissionen entscheidende Ziel der aerodynamischen Optimierung ist die Reduzierung des Luftwiderstands bzw. des Produkts zwischen der Stirnfläche A und dem Luftwiderstandsbeiwert c_w. Als Orientierungswert gilt, dass der Luftwiderstand bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von ca. 80 km/h ungefähr der Summe der restlichen Fahrwiderstände entspricht und darüber hinaus überproportional ansteigt [WAL11].

Die c_w-Werte konnten in der Vergangenheit kontinuierlich verbessert werden, siehe Abb. 12-8. Der erkennbare asymptotische Verlauf der c_w-Werte zeigt jedoch eine Art Sättigung der Optimierungspotenziale und legt nahe, dass ein Wert von 0,25 nur mit hohem Aufwand weiter unterschritten werden kann [HUC07]. Moderne Fahrzeuge weisen abhängig vom Fahrzeugsegment c_w-Werte von ca. 0,3 auf, bei einer Stirnfläche von ca. 2 m² [WAL11].

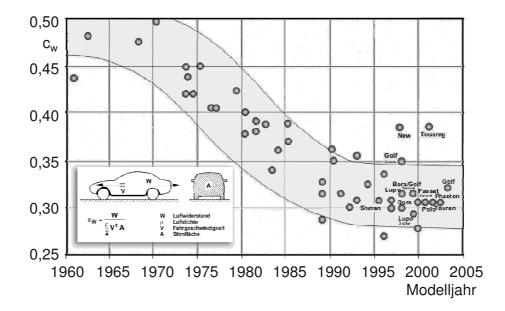


Abb. 12-8: Entwicklung des c_w-Wertes [HUC07]

Dieser Sättigungsverlauf kann unter anderem dadurch begründet werden, dass die Formen von Pkw sich stark ähneln bzw. gleiche Optimierungsverfahren durchgeführt werden. Als bedeutendste Ursache gilt jedoch, dass andere Entwicklungsziele in der heutigen Zeit im Vergleich stärker gewichtet werden, z.B. die Fahrzeugsicherheit und das Fahrzeugdesign [BOS07].

Erfahrungswerte belegen die Korrelation, dass mit einer Reduzierung des Luftwiderstandes um 10 % eine Reduzierung der CO₂-Emissionen von ca. 2,5 % einhergeht [HUC07] [RIC11]. Zur Optimierung der Fahrzeugform wird auf Simulations- und Messtechnik im Windkanal und das Verfahren der numerischen Strömungsmechanik zurückgegriffen. Es können grundsätzlich die beiden verschiedenen Ansätze verfolgt werden, so dass eine optimierte Formgebung entweder komplett neu erforscht wird oder für vorhandene Fahrzeugformen anhand bekannter strömungsmechanischer Phänomene Verbesserungspotenziale identifiziert werden können [HUC07].

Aufgrund der Fülle an Eigenschaften, welche mit der Fahrzeugform zusammenhängen, scheint für den Zeitraum bis 2020 vor allem die Summation vieler kleiner Änderungen realistisch um den c_w-Wert zu senken. Hier kommen vor allem eine Optimierung der A-Säule, der Spiegel, des Hecks, der Räder, der Kühlluftdurchstörmung sowie ein geglätteter Unterboden in Frage [HUC07].

Ein praktisches Beispiel für die Durchführung dieser Maßnahmen ist der Volkswagen Polo Blue Motion des Modelljahrs 2009. Hier wurden der Stoßfänger und die Seitenschweller optimiert, die Karosserie um 10 mm abgesenkt und am Dachende ein angepasster Heckspoiler angebracht. Darüber hinaus erhielt das Fahrzeug einen speziellen Unterboden sowie einen geschlossenen Kühlergrill. Dadurch konnte der Luftwiderstandsbeiwert im Vergleich zur Serie mit einem c_w-Wert von 0,32 um 6 % auf 0,30 abgesenkt werden [AMS12]. Nach der zuvor

beschriebenen Faustformel entspricht dies einer CO₂-Einsparung von ca. 1,5 %. Abb. 12-9 zeigt den Vergleich zwischen dem Basismodell und der Blue Motion-Version des Polos mit inkrementellen Optimierungen der Fahrzeugform.

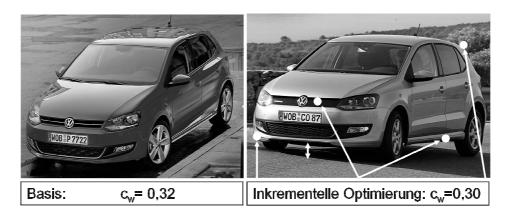


Abb. 12-9: Inkrementelle aerodynamische Optimierung am VW Polo Blue Motion [Bildquelle: Volkswagen AG]

Die Studie XL1 von Volkswagen zeigt exemplarisch das aerodynamische Potenzial bei der Neugestaltung der gesamten Fahrzeugform ab der Design-Phase auf. In Richtung des Fahrzeughecks wird die Karosserieform schmaler und passt sich im Heckbereich dem Strömungsverlauf optimal an. Zur Vermeidung von Verwirbelungen an den Rädern sind davor und dahinter kleine Spoiler angebracht und die hinteren Räder voll verkleidet. Die Luftzufuhr zur Kühlung des Motors, des Innenraumes und sonstiger Komponenten erfolgt über elektrisch geregelte Lamellen im unteren Bereich der Fahrzeugfront. Letzteres ist ein Beispiel für eine aktive aerodynamische Maßnahme, bei der die Kühlung bedarfsgerecht gesteuert wird. Zusätzlich wurden die Außenspiegel durch Kameras ersetzt. Dadurch erreicht das Fahrzeug eine Stirnfläche von 1,5 m² und einen c_w-Wert von 0,186 [VOL12b].



Abb. 12-10: Potenziale einer aerodynamische Optimierung ab Designphase am Beispiel des zweisitzigen VW XL1 [Bildquelle: Volkswagen AG]

Die Kosten für eine aerodynamische Formoptimierung sind nur schwer abzuschätzen. Idealer Weise erfolgt die aerodynamische Optimierung bereits zur Entstehungszeit des Fahrzeugkonzepts. Dann können Kosten und eine Gewichtserhöhung reduziert werden, indem die Anzahl zusätzlicher Anbauteile gering gehalten wird [BOS07]. Während zusätzliche An-

bauteile wie Unterboden- oder Radhäuserverkleidungen meist Kosten verursachen, können Maßnahmen wie ein optimiertes Fahrzeugdesign oder schmalere Reifen sogar kostenfrei sein [RIC11].

Neben der beschriebenen Optimierung der Fahrzeugform kann der Luftwiderstand auch über eine Verringerung der Fahrzeuggröße bzw. der Stirnfläche erreicht werden, wobei die Fahrzeuggröße meist durch die Fahrzeuganwendung sowie Kundenanforderungen vorgegeben ist. Davon abgesehen besteht hier erhebliches Potenzial, da die Fahrzeuge in der Vergangenheit stetig größer geworden sind [RIC11].

Für die Analyse wird zwischen einem Aerodynamik-Design, bei dem eine Berücksichtigung der Aerodynamik ab Designphase erfolgt, und einer Aerodynamik-Optimierung, welche ein bestehendes Design verbessert, unterschieden. Für beide Aerodynamik-Maßnahmen werden jeweils Kosten zwischen 60 € und 70 € angesetzt, wodurch bei der Optimierung ein CO₂-Potenzial von 1,5 % und beim anfänglichen Design ein Potenzial von 2 % erreicht wird.

12.4 Effizienzerhöhung der Energiebereitstellung

Nachfolgend werden die fahrzeugseitigen Maßnahmen erläutert, die über eine Effizienzsteigerung bei der Energieumwandlung vom ursprünglichen Energieträger zur mechanischen Leistung an den Antriebsrädern den Energieverbrauch senken können. Dazu werden zu Beginn Optimierungen an konventionellen Verbrennungsmotoren betrachtet, um dann die Potenziale von alternativen Kraftstoffen gegenüber dem konventionellen Otto- und Dieselkraftstoff zu untersuchen. Anschließend werden die Möglichkeiten verschiedener Getriebekonzepte aufgezeigt. Schließlich werden die Potenziale einer Elektrifizierung des Antriebsstrangs analysiert, wobei neben Hybridantrieben auch auf batterie- und brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge eingegangen wird.

12.4.1 Optimierung von konventionellen Verbrennungsmotoren

In konventionellen Verbrennungsmotoren wird nur ein kleiner Teil der Kraftstoffenergie von ca. 15 % bis 18 % zum Antrieb des Kraftfahrzeugs verwendet, siehe Abb. 12-11. Die größten Verluste stellen mit insgesamt zwei Dritteln thermische Verluste durch Motorkühlung und Abgaswärme dar. Darüber hinaus entstehen weitere Verluste durch Reibung in Motor und Antriebstrang, durch Ladungswechsel bzw. Drosselverluste, durch Leerlauf- und Bremsverluste sowie durch den Betrieb von Nebenaggregaten. Zur Steigerung der Ausbeute bei der Energiewandlung und damit der Effizienz können die Verluste reduziert werden [ECK10b].

Grundsätzlich kann bei Verbrennungsmotoren zwischen Otto- und Dieselmotoren unterschieden werden. Ein Ottomotor ist ein Hubkolbenmotor, bei dem das Gemisch im Kompressionstakt verdichtet und vor dem oberen Totpunkt (OT) des Zylinders durch einen Zündfunken entflammt wird. Ein Dieselmotor zeichnet sich dagegen dadurch aus, dass im Kompressionstakt eine Selbstzündung stattfindet [BOS07]. Im Vergleich zu Ottomotoren sind beim Dieselmotor die möglichen Optimierungspotenziale grundsätzlich geringer anzusiedeln, da

derzeitige Dieselmotorapplikationen bereits Technologien wie Direkteinspritzung und Aufladung nutzen und ein hohes Verdichtungsverhältnis aufweisen [MOC10][RIC11].

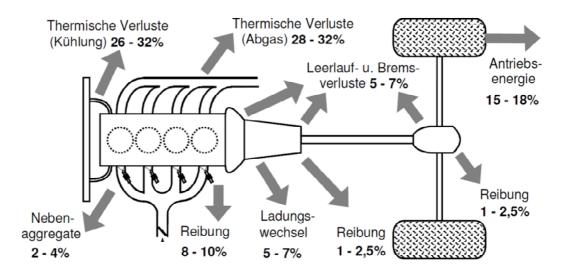


Abb. 12-11: Verteilung der energetischen Verluste im Verbrennungsmotor [ECK10b]

12.4.1.1 Direkteinspritzung

Der Ottomotor wird im Gegensatz zum Dieselmotor heute noch größtenteils mit äußerer Gemischbildung betrieben. Die Bildung eines zündfähigen Luft-Kraftstoffgemisches erfolgt außerhalb des Brennraums durch eine Saugrohreinspritzung [BOS07]. Eine Direkteinspritzung ermöglicht dagegen eine innere Gemischbildung, bei der der Kraftstoff direkt in den Brennraum eingespritzt wird. Während diese Technologie bei Dieselmotoren bereits zum Standard gehört, bietet sie im Ottomotor noch große Effizienzpotenziale [RIC11]. Lediglich 14 % aller mit Benzin betriebenen Neuzulassungen in der EU waren 2010 damit ausgerüstet. Die Direkteinspritzung kommt derzeit vor allem in der oberen Mittelklasse, in der Oberklasse und bei Sportwagen zum Einsatz [ICC11d]. Für eine detailliertere Segmentbetrachtung siehe Abb. 13-10 im Anhang.

Bei der direkten Einspritzung des Kraftstoffs in den Brennraum, verdampft dieser und kühlt dadurch den Brennraum. Dadurch wird die Neigung des Gemisches zur Selbstzündung, der sogenannten Klopfneigung, reduziert. Dies erlaubt wiederum eine höhere Verdichtung und führt zu einem verringerten Kraftstoffverbrauch. Zusätzlich ermöglicht die verringerte Temperatur eine höhere Zylinderfüllung, wodurch eine höhere Motorleistung erreicht werden kann [RIC11]. Über eine Mehrfacheinspritzung kann darüber hinaus die Vermischung und Kühlung des Luft-Kraftstoffgemisches verbessert und die Verbrennung optimiert werden [EPA10b].

Es lassen sich zwei Verfahren der Benzin-Direkteinspritzung voneinander unterscheiden. Bei der einfachen Variante, der homogenen Direkteinspritzung, wird ein stöchiometrisches Luft-Kraftstoffgemisch erzeugt. Ein solches Gemisch ist dadurch definiert, dass ein Luft-Kraftstoffgemisch vorliegt, welches eine vollständige Verbrennung des Kraftstoffes ermöglicht, ohne dass Sauerstoff fehlt oder übrig bleibt.

Durch das Verfahren des Schichtladebetriebs kann eine weitere Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs erreicht werden, welche sich vorrangig im Teillastbereich auswirkt. Hierbei wird ein mageres, d.h. kraftstoffarmes Gemisch erzeugt. Damit dieses magere Gemisch zünden kann, wird in der Nähe der Zündkerze ein fettes, d.h. kraftstoffreiches, zündfähiges Gemisch gebildet, welches das magere Gemisch in der Umgebung mit entzünden kann. Der zusätzliche Verbrauchsvorteil gegenüber dem homogenen Verfahren besteht darin, dass beim Abrufen des Drehmoments die Drosselklappe weiter geöffnet werden kann als bei der stöchiometrischen Gemischbildung, so dass Drosselverluste reduziert werden [HEI12].

Nachteilig bei Schichtladungskonzepten war anfangs die komplizierte Gemischbildung, welche häufig durch eine spezielle Brennraumgestaltung, Kolben und Einlasskanalformen gewährleistet wurde. Bei höheren Drehzahlen und Lasten laufen jedoch auch diese Motorkonzepte mit einem stöchiometrischen Gemisch. Die zerklüftete Brennraumform früherer Schichtladungskonzepte führte dabei jedoch zu einer schlechteren Verbrennung, so dass Verbrauchsvorteile in diesen Betriebspunkten teilweise kompensiert wurden [HEI12].

Diese Problematik wurde durch die Einführung der strahlgeführte Direkteinspritzung umgangen. Dabei wird der Kraftstoff so definiert eingespritzt, dass keine aufwendige Brennraumform benötigt wird. Dafür war die Verfügbarkeit von Piezo-Injektoren eine wichtige Voraussetzung. Diese zeichnen sich durch eine schnelle Reaktionszeit aus und ermöglichen variable Einspritzstrategien. Charakteristisch bei strahlgeführten Verfahren ist die zentrale Position und räumliche Nähe vom Injektor zur Zündkerze, siehe Abb. 12-12. Das dargestellte strahlgeführte Verfahren ermöglicht eine moderat ausgeführte Kolbenmulde, so dass im Schichtlade- und Homogenbetrieb der Verbrauch und die CO₂-Emissionen gesenkt werden können [BRE06].

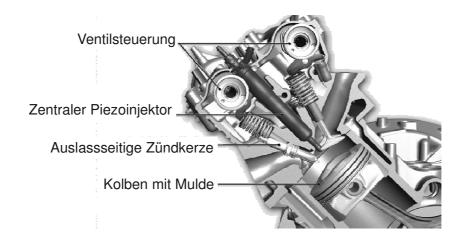


Abb. 12-12: Strahlgeführte Benzin-Direkteinspritzung von Mercedes-Benz [BRE06]

Ein wesentlicher Nachteil von allen Magerkonzepten und gleichzeitiger Kostentreiber ist die Tatsache, dass aufgrund des Sauerstoffüberschusses im Gemisch keine Abgasnachbehandlung mittels eines Dreiwegekatalysators, wie bei der homogenen Direkteinspritzung, möglich ist. Dies stellt hohe Anforderungen an die Abgasnachbehandlung von Stickoxiden

(NO_x) und erfordert aufwendigere Systeme wie einen motornahen Dreiwegekatalysator mit einem NO_x-Speicherkatalysator [BRE06].

Trotz der geringen Marktpenetration in 2010 hat die Direkteinspritzung auch bei Ottomotoren, vor allem im Homogenbetrieb, bereits eine hohe Technologiereife. Sie wird heute bereits in verschiedenen Modellen von BMW, VW, Ford und Toyota eingesetzt. Aufgrund der erhöhten Leistungsdichte wird diese Technologie als unterstützende Maßnahme zum Downsizing angewendet und ergänzt sich gut mit Aufladungskonzepten und variablen Ventiltrieben [EPA10b]. Für die weitere Betrachtung wird für die homogene Direkteinspritzung ein CO₂-Potenzial von 3 % und damit verbundene Kosten von 150 € angenommen. Eine Direkteinspritzung nach dem Schichtladeprinzip erreicht dagegen 8 % CO₂-Einsparung zu Kosten zwischen 500 € und 600 €. Für die Direkteinspritzung ergibt sich ein Mehrgewicht zwischen 0,1 % und 0,2 %.

Dieselmotoren weisen im Vergleich zu Benzinmotoren nur noch geringere Verbesserungspotenziale auf. Eine Effizienzsteigerung wird in Zukunft vor allem durch höhere Einspritzdrücke zwischen 2.000 bar und 2.400 bar erwartet sowie durch eine verbesserte Nutzung mehrfacher Einspritzungen [RIC11]. Die Potenziale von verbesserten Diesel-Einspritzsystemen wurden nicht separat betrachtet, sondern fließen im Rahmen der Technologie Downsizing in die Analyse ein.

12.4.1.2 Gekühlte Abgasrückführung

Das Prinzip der Abgasrückführung spielt grundsätzlich für die Minderung von Schadstoffemissionen bei Otto- und Dieselmotoren eine bedeutende Rolle. Durch die hohen Verbrennungstemperaturen im Motor entstehen zunehmend Stickoxide (NO_x) als Schadstoffemissionen. Eine Senkung der Emissionen kann über eine Abgasrückführung (AGR) erreicht werden, welche zu einer Temperatursenkung führt. Eine einfache Methode der Abgasrückführung kann über eine Ventilüberschneidung erreicht werden, bei der das Einlassventil früh geöffnet wird und sich dadurch Abgas mit dem Frischgas vermengt. Sie wird als interne AGR bezeichnet. Bei der externen Abgasrückführung wird dagegen ein Teil der Abgase zur Saugseite geführt und dem Frischgas beigemischt. Die Reduzierung von NO_x-Emissionen kann weiter verbessert werden, indem das Abgas vor seiner Beimischung gekühlt wird [BOS07].

Eine solche externe gekühlte AGR kann darüber hinaus, vor allem beim Ottomotor, zu einer Absenkung des Kraftstoffverbrauchs führen. Eine Beimischung des nicht brennbaren Gemisches ermöglicht es, die Drosselklappe weiter zu öffnen und dadurch Strömungsverluste zu verringern. Außerdem ermöglicht die Absenkung der Temperatur eine höhere Verdichtung. Die Vorteile einer gekühlten externen Abgasrückführung wirken sich vor allem bei hohen Lasten und Drehzahlen aus. Dies hat zur Folge, dass über die Vorteile im NEFZ hinaus, vor allem der reale Kundenverbrauch mit einem hohen Volllastanteil profitiert. Diese Form der AGR beim Ottomotor wird daher auch als Hochlast-AGR bezeichnet. Abb. 12-13 zeigt die Verbrauchs- bzw. CO₂-Reduzierung im Kennfeld gegenüber einer einfachen internen AGR in einem typischen Fahrbereich.

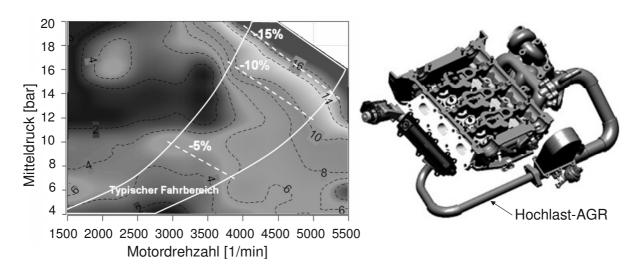


Abb. 12-13: Verbrauchsreduzierung im Kennfeld bei externer gekühlter AGR (links) und Hochlast-AGR-System von Mahle (rechts) [MUE07][KOR08]

Die extern gekühlte AGR eignet sich besonders zur weiteren Optimierung von Downsizing-Motoren mit Turboaufladung und Direkteinspritzung im Volllastbereich. In der Kombination mit einer homogenen Direkteinspritzung kann eine gekühlte AGR eine ähnliche CO₂-Reduzierung im NEFZ wie bei aufgeladenen Direkteinspritzern mit Schichtladebetrieb erreichen [LAN07][MUE07].

Die Wirkung des Systems im Ottomotor wurde bereits demonstriert, befindet sich jedoch im Forschungsstadium im Hinblick auf eine System- und Kostenoptimierung [EPA10b]. Eine Anwendung wird lediglich im SEG-2 und SEG-3 mit Potenzialen um 4 % und damit verbundenen Kosten von 200 € erwartet. Das Mehrgewicht wird mit 0,5 % angesetzt.

Bei Dieselmotoren kommt eine externe AGR bereits häufig zum Einsatz, wobei hier die Schadstoffreduzierung im Vordergrund steht. Doch auch für Dieselmotoren tritt der verbrauchssenkende Effekt dieser Technologie in Zukunft in den Vordergrund. Allerdings ist hier im Vergleich zu Ottomotoren eine geringere Reduzierung von Verbrauch und Emissionen möglich [GER08]. Für eine im Hinblick auf Kühlung und Strömung verbesserte AGR im Dieselmotor wird ein CO₂-Potenzial von 2 % und damit verbundenen Kosten zwischen 160 € und 200 € erwartet.

12.4.1.3 Downsizing und Aufladung

Der Begriff Downsizing beschreibt eine Reduzierung des Hubraums von Verbrennungsmotoren bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit, wodurch der Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen gesenkt werden können. Eine Verringerung des Hubraums hat zur Folge, dass Pump- und Drosselverluste sinken, da der Motorbetriebspunkt hin zu höheren Lasten verschoben werden kann. Darüber hinaus werden die Reibleistung, Wärme-Transfer-Verluste sowie das Aggregatgewicht reduziert [MOT12][SHA10].

Zur Erhaltung der Leistung trotz kleineren Hubraums wird die Luft vor Eintritt in die Zylinder vorverdichtet. Da die Leistung eines Motors proportional zu dem Luftmassendurchsatz ist, kann dadurch die Leistung eines bezüglich Hubvolumen und Drehzahl vorgegebenen Motors erhöht werden [BOS07]. Als Messgröße für die hubraumbezogene Leistung wird häufig der effektive Mitteldruck p_{me} verwendet. Der erreichbare Aufladegrad und der damit verbundene effektive Mitteldruck hängen vor allem von den verwendeten Technologien, aber auch von der Temperaturerhöhung bei der Verdichtung ab. So kann durch Einsatz einer Ladeluftkühlung die verdichtete Luft auf ihre Ausgangstemperatur zurückgekühlt werden und damit mehr Luftmasse in den Brennraum gebraucht werden [BOS07].

Es wird zwischen zwei grundlegenden Kategorien von Aufladesystemen unterschieden. Bei der mechanischen Aufladung wird ein Verdichter mechanisch mit Hilfe der Leistung des Verbrennungsmotors angetrieben. Während dieses System relativ einfach zu realisieren ist und nahezu verzögerungsfrei anspricht, erhöht sich durch den Antrieb des Kompressors allerdings der Kraftstoffverbrauch. Zur Erhöhung der Energieeffizienz im Rahmen des Downsizings wird daher häufig auf einen oder mehrere Turbolader zurückgegriffen, um die spezifische Leistung zu erhöhen. Dieser besteht aus einer Kombination von einer Abgasturbine mit einem Verdichter. Dabei nutzt die Turbine die Energie des Abgases zum Antrieb des Verdichters, welcher dann das Frischgas vor Eintritt in den Brennraum verdichtet [BOS07]. Eine vergleichende Darstellung der Turboaufladung und mechanischer Aufladung zeigt Abb. 12-14.

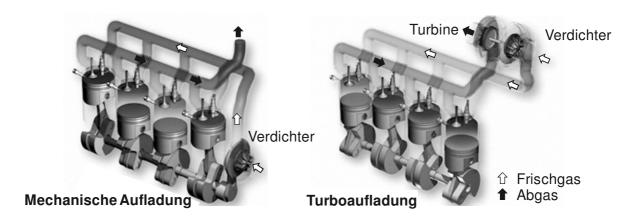


Abb. 12-14: Funktionsweise der mechanischen Aufladung (links) und eines Turboladers (rechts) [In Anlehnung an [BOR12]]

Während durch die Turboaufladung eine erhebliche Steigerung der Hubraumleistung erreicht wird, stellt das niedrige Grunddrehmoment bei niedrigen Motordrehzahlen eine wesentliche Schwäche dar. Dieses Phänomen wird häufig als Turboloch bezeichnet. Da man deshalb bei der Auslegung einen hohen Druck bei niedrigen Drehzahlen anstrebt, steigt in der Folge bei sehr hohen Drehzahlen der Druck so stark an, dass der Motor überlastet würde. Um dies zu verhindern, muss der Turbolader über das sogenannte Wastegate umgangen werden, wodurch Abgasenergie verloren geht [BOR12]. Das Ziel neuer Aufladungskonzepte ist folglich

diesen Auslegungskonflikt zu umgehen und ausreichend Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen zur Verfügung zu stellen.

Eine Möglichkeit hierzu sind Turbolader mit variabler Turbinengeometrie. Aufgrund der hohen Abgastemperaturen beim Ottomotor im Vergleich zum Dieselmotor ist eine Anwendung bei mit Benzin betriebenen Motoren aufgrund hoher Materialanforderungen allerdings sehr aufwendig und teuer. Variable Turbinengeometiren kommen daher nur in wenigen Fahrzeugen des oberen Segments, vor allem bei Dieselmotoren, zum Einsatz.

Der Twin-Scroll-Turbolader bietet eine Alternative zur variablen Turbinengeometrie. Dieser erreicht zwar nicht dieselben Leistungswerte, eignet sich jedoch besser für Anwendungen mit hohen Temperaturen wie im Ottomotor. Durch einen zweiflutigen Abgaskrümmer wird dabei eine Abgastrennung realisiert, welche bis kurz vor der Turbine beibehalten wird. In der Folge ergibt sich ein besseres Anströmverhalten der Abgasturbine, so dass auch hier das Ansprechverhalten dem des Saugmotors angenähert wird.

Ein anderes Konzept stellt die mehrstufige Aufladung mit zwei oder drei Turboladern dar. Dabei werden diese so miteinander verschaltet, dass im gesamten Drehzahlbereich die Verfügbarkeit eines hohes Drehmoments und eines guten Ansprechverhaltens ermöglicht wird. Abb. 12-15 zeigt schematisch das Prinzip einer zweistufigen Aufladung. Hier kommt im niedrigen Drehzahlbereich ein kleiner Hochdruck-Turbolader zum Einsatz und bei hohen Drehzahlen größerer Niedrigdruck-Turbolader [BOR12]. Ein Beispiel für ein dreistufiges Aufladungskonzept in Serie stellt der Diesel-Motor der BMW-M GmbH dar, welcher z.B. im Modell M550d zum Einsatz kommt.

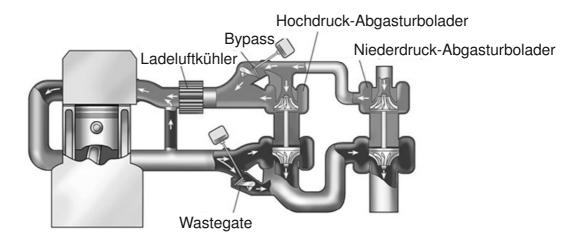


Abb. 12-15: Funktionsprinzip einer zweistufigen Turboaufladung von BorgWarner [BOR12]

Ein anderes Konzept stellt die Kombination von Turboaufladung und mechanischer Aufladung von Volkswagen dar. Der TSI-Twincharger-Motor ist ein Downsizing-Konzept, das sich durch eine Reihenschaltung eines Kompressors mit einem Turbolader auszeichnet, wobei der Kompressor für ein gutes Ansprechverhalten bei niedrigen Drehzahlen sorgt [HEI12].

Für die zukünftige Optimierung von Aufladungssystemen stellt auf lange Sicht auch der eBooster von BorgWarner ein mögliches Konzept dar. Anstelle einer Reihenschaltung von zwei Turboladern oder der Verwendung eines Kompressors, sind ein Turbolader und ein elektrisch angetriebener Verdichter in Reihe geschaltet [HEI12][BOR12].

Aufgeladene Downsizing-Motoren entfalten Synergiepotenziale mit Technologien wie der Benzindirekteinspritzung oder einem variablen Ventiltrieb und kommen daher häufig kombiniert zum Einsatz [RIC11]. Für die Analyse wurde ein dreistufiges Downsizing-Potenzial für Benzinmotoren angesetzt, wobei die Hubraumreduzierung durch Maßnahmen zur Leistungskompensation flankiert werden muss. Die erste Stufe kann durch eine einfache Aufladung in Kombination mit einer homogenen Direkteinspritzung realisiert werden. Die zweite Stufe baut neben einer verbesserten Aufladung und Einspritzung auf einer vollvariablen Ventilsteuerung auf. Die dritte Stufe des Downsizings könnte über neue Aufladungskonzepte wie variable Turbinengeometrien oder mehrstufige Aufladungskonzepte verwirklicht werden. Über den Zeitraum ab 2020 kann ein weiteres Downsizing durch innovative Aufladungskonzepte, Hochlast-AGR oder eine variable Verdichtung unterstützt werden. Die Potenziale des Downsizings liegen zwischen 4 % und 17 %, wobei Kosten zwischen 150 € und 700 € anfallen können. Als weitere Konsequenz reduziert sich das Fahrzeuggewicht um 0,3 % bis 0,8 %.

In aktuellen Dieselmotoren werden bereits Maßnahmen wie Direkteinspritzung und Turboaufladung verwendet, so dass Downsizing bei Ottomotoren im Vergleich größere Potenziale aufweist [RIC11]. Bei Dieselmotoren können jedoch eine Erhöhung des Einspritzdruckes und verbesserte Aufladungskonzepte zum weiteren Downsizing verwendet werden [GER08]. Im weiteren Verlauf wird bei Dieselmotoren ein dreistufiges Downsizing-Potenzial angesetzt, unter der Annahme, dass die erste Stufe bereits realisiert wurde. Während in der zweiten Stufe verbesserte Aufladungs- und Einspritzsysteme zum Einsatz kommen, werden in der dritten Stufe neue Aufladungskonzepte und eine hinsichtlich Kühlung und Durchfluss optimierte AGR realisiert. Abb. 12-16 fasst die Potenziale und Kosten der Downsizing-Stufen zusammen.

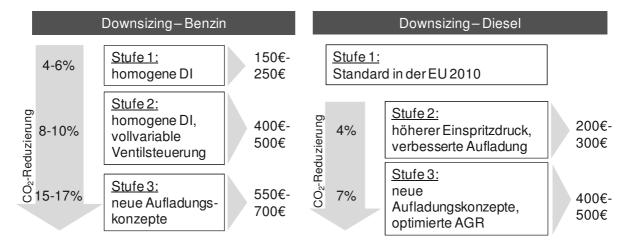


Abb. 12-16: Downsizing Stufen und resultierende CO₂-Reduzierungen und Kosten

Über das Jahr 2020 hinaus bieten innovative Aufladungskonzepte, eine vollvariable Ventilsteuerung sowie die variable Verdichtung weitere Verbesserungspotenziale. Für das Downsizing bei Dieselmotoren wird ein Potenzial zwischen 4 % und 7 % zu Kosten zwischen 200 € und 500 € angesetzt. Die Gewichtsreduzierung liegt äquivalent zu Benzinfahrzeugen zwischen 0,3 % und 1 %.

12.4.1.4 Variabler Ventiltrieb

Der Ventiltrieb eines Motors ist dafür verantwortlich, den Gaswechsel des Verbrennungsmotors zu steuern, bei dem das Arbeitsgas ausgetauscht und auf den Ausgangszustand des Kreisprozesses gebracht wird. Der Ventiltrieb besteht im Allgemeinen aus Ein- und Auslassventilen, den schließenden Ventilfedern, dem Nockentrieb und den Übertragungsgliedern. Zur Ermöglichung des Gaswechsels treibt die Kurbelwelle eine mit halber Motordrehzahl drehende Steuerwelle an. Diese sogenannte Nockenwelle öffnet die für das Ausschieben der verbrauchten Gase und das Ansaugen der Frischluft ausgelegten Gaswechselventile. Bei diesem konventionellen Ventiltrieb mit starren Steuerzeiten stellt die Auslegung immer einen Kompromiss zwischen dem erreichbaren Drehmoment und dessen Lage sowie der erreichbaren Leistung bei Nenndrehzahl dar [BOS07].

Mit Hilfe variabler Öffnungs- und Schließcharakteristika der Ein- und Auslassventile kann die Effizienz und Leistungsfähigkeit von Motoren verbessert werden, indem hohe Drehmomentwerte bereits bei geringen Drehzahlen anliegen. Variable Ventiltriebe passen je nach Ausführung die Schließ- und Öffnungszeiten sowie die Hubhöhen dem Betriebspunkt des Motors und der Lastanforderung entsprechend an. Dadurch können Pump- und Drosselverluste eines Motors, vor allem im Teillast-Bereich wie im Stadtverkehr, reduziert werden. Eine variable Steuerung des Gaswechsels kann darüber hinaus auch Auswirkungen auf die Abgasnachbehandlung nehmen, indem der Trade-Off zwischen CO₂-Emissionen und NO_x-Schadstoff-Emissionen verbessert wird [RIC11].

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von variablen Ventilsteuerungen. Technologien mit der Bezeichnung Variable Valve Timing (VVT) ermöglichen lediglich eine Anpassung der Zeitpunkte. Eine Realisierung erfolgt meist über eine Verdrehung der Nockenwelle relativ zur Kurbelwelle über einen Nockenwellensteller, auch Cam-Phaser genannt [BOS07].

Eine vollvariable Ventilsteuerung ermöglicht darüber hinaus auch die Anpassung der Ventilhübe. Bei Technologien der vollvaribalen Ventilsteuerung wird zwischen diskreten und kontinuierlichen System unterschieden. Vollvariable diskrete Systeme werden häufig mit "Cam-Profile-Swiching" (CPS) bezeichnet. Dabei wählt ein hydraulisch oder elektromagnetisch aktuiertes mechanisches System zwischen zwei oder drei Nockenprofilen aus. Anwendungsbeispiele für diese serienreife Technologie sind z.B. die Systeme "Honda VTEC", "Porsche VarioCam" oder "Audi valvelift". Abb. 12-17 veranschaulicht die Funktionsweise eines fortschrittlichen CPS-System.

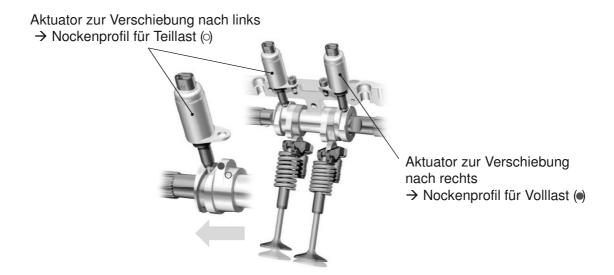


Abb. 12-17: Vollvariable diskrete Ventilsteuerung Audi valvelift [Bildquelle: Audi AG]

Hier sorgt ein schnell ansprechendes, elektromagnetisch angetriebenes System über ausfahrbare Aktuatoren und Hülsen mit spiralförmigen Nuten dafür, dass pro Ventil zwei Nockenstücke verschoben werden können. Dadurch lässt sich der Ventilhub in zwei Stufen varieren. Der linke Aktuator verursacht eine Verschiebung der Nockenstücke nach links. Dadurch kommen Nockenprofile für die Teillast und niedrige Drehzahlen zum Einsatz, welche beide Einlassventile über Rollenschlepphebel mit geringem und unterschiedlichem Ventilhub öffnen. Dies ermöglicht eine spezielle Strömung für eine effiziente und saubere Verbrennung. Für den Volllastbetrieb werden die Nockenstücke durch den rechten Metallstift nach rechts verschoben, so dass das zweite Nockenprofil zum Einsatz kommt. Dadurch öffnen die Ventile synchron und mit einem hohen Ventilhub, sodass eine hohe Füllmenge und Strömungsgeschwindigkeit erreicht wird [AUD12].

Ein komplexeres System ermöglicht die kontinuierliche Variation der Ventilsteuerzeiten und Hübe. Dies ermöglicht den Entfall der Drosselklappe, sehr niedrige Ladungswechselverluste sowie die Darstellung flexibler interner Abgasrückführraten zur Senkung von Stickstoffemissionen. Ein Beispiel für ein kontinuierliches System ist die "BMW valvetronic", siehe Abb. 12-18.

Bei diesem System wird eine kontinuierliche Variation über einen verstellbaren Zwischenhebel realisiert, welcher zwischen Nockenwelle und Schlepphebel zur Ventilbetätigung liegt. Der Verstellmechanismus besteht darüber hinaus aus einer Exzenterwelle und einer Rückstellfeder [BMW12]. Deutlich wird die im Vergleich zum CPS-System höhere Systemkomplexität. Während bei den derzeitigen Systemen noch eine mechanische Verbindung der Ventile zur Kurbelwelle für den Regelbetrieb besteht, wird als maximale Ausbaustufe dieser Technologie ein Wegfall dieser mechanischen Verbindung erwartet [RIC11]. Eine vollvariable Ventilsteuerung ermöglicht zusammen mit weiteren Maßnahmen außerdem die Funktionalität der Zylinderabschaltung [EPA10b].

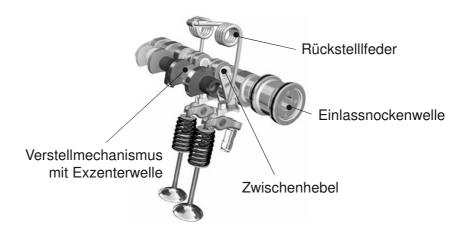


Abb. 12-18: Vollvariable kontinuierliche Ventilsteuerung BMW Valvetronic [Bildquelle: BMW Group]

Für Benzinfahrzeuge wird die variable Ventilsteuerung mit 3 % und damit verbundenen Kosten von 100 € angesetzt. Für vollvariable Systeme zur Ventilsteuerung wird im Durchschnitt eine CO₂-Reduzierung von 8 % bis 10 % erwartet, wobei Kosten zwischen 300 € und 360 € anfallen. Die Gewichtszunahme bei variabler und vollvariabler Ventilsteuerung beträgt 0,2 % bis 0,5 %.

Bei Dieselfahrzeugen wird der Einsatz einer vollvariablen Ventilsteuerung mit 1 % angesetzt. Dabei entstehen Kosten von ca. 280 € und eine Gewichtserhöhung um ca. 0,5 %.

12.4.1.5 Zylinderabschaltung

Eine weitere Technologie zur CO₂-Reduzierung ist die Zylinderabschaltung. Diese ist anwendbar auf Motoren mit einer geraden Zylinderzahl ab vier Zylindern. Ist die Zylinderabschaltung aktiv, wird der Motor mit einer verringerten Anzahl an Zylindern betrieben, so dass die verbleibenden aktiven Zylinder mit einer erhöhten Last arbeiten. Dadurch können Pumpund Drosselverluste reduziert und die Effizienz des Motors, vor allem im Teillastbereich, gesteigert werden [ATZ12a].

Das größte Einsparpotenzial liegt also bei niedrigen Drehzahlen und niedrigen Lasten vor, z.B. bei konstanter Fahrt. Steigt die Drehzahl auf ein bestimmtes Niveau oder beschleunigt der Fahrer, aktiviert eine Steuerung wieder alle Zylinder des Motors. Bei der Zylinderabschaltung müssen im Allgemeinen nicht nur die Kraftstoffzufuhr für die abzuschaltenden Zylinder deaktiviert, sondern auch die zugehörigen Ventile geschlossen werden. Dies wird in der Regel über eine variable Ventilsteuerung erreicht. Die Zylinderabschaltung stellt eine Alternative zur Reduzierung der Zylinderzahl dar, z.B. wenn die Zylinderzahl aus Leistungsgründen beibehalten und trotzdem niedrige Verbrauchs- und Emissionswerte im Fahrzyklus erreichen werden sollen [EPA10] [ATZ12a][SHA10].

Ein Beispiel dafür, dass diese Technologie bereits bei einem Vierzylinder-Motor möglich ist, zeigt der neue VW-Motor EA211 mit 1,4 Litern Hubraum und Aufladung, welcher Anfang

2012 erstmals im Modell Polo auf den Markt kommt. Durch die Zylinderabschaltung lassen sich bei der Integration in einem VW Polo Kraftstoffeinsparungen von 0,4 l/100km entsprechend einem CO₂-Ausstoß von 9 g CO₂/km im NEFZ erreichen. Die Zylinderabschaltung kommt vorrangig für direkteinspritzende Motoren in Frage, da es bei einer Saugrohreinspritzung zu Problemen bei Gaswechseln kommen kann [ATZ12a].

Mit Hilfe einer Zylinderabschaltung können bei Benzinfahrzeugen im Durchschnitt 5 % CO₂ und damit verbundene Kosten zwischen 100 € und 120 € eingespart werden. Für Dieselfahrzeuge beträgt die mögliche Einsparung 3 % bei Kosten zwischen 150 € und 170 €.

12.4.1.6 Variable Verdichtung

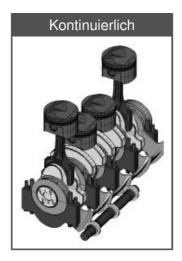
Die Effizienz bzw. der thermische Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors ist zum Großteil von dem realisierten Verdichtungsverhältnis abhängig. Dieses ist normalerweise fixiert und beschreibt das Verhältnis der Volumina zwischen dem unteren und dem oberen Totpunkt. Durch hohe Verdichtungsraten wird der Motor effektiver, wobei die Grenze der Verdichtung durch den Punkt bestimmt wird, bei dem es zu ungewollten spontanen Selbstzündungen kommt. Bei Teillast ist die zwecks maximaler Leistung gewählte Verdichtung allerdings nicht mehr optimal [SHA10]. Hier kann eine variable Verdichtung (VCR) die dynamische Anpassung an den aktuellen Lastpunkt ermöglichen, indem sehr hohe Verdichtungsraten bis zum Faktor 16 gewählt werden [FEV12a].

Vor allem für Downsizing-Motoren-Konzepte bietet sich die variable Verdichtung als eine Möglichkeit zur Optimierung an, da bei diesen Motoren die Verdichtungsrate konzeptbedingt abgesenkt werden muss. Weiterhin kann eine betriebspunktabhängige Variierung der Verdichtung einen großen Beitrag leisten, um das Potenzial von Downsizing-Motoren voll auszunutzen [FEV12a]. Außerdem könnten in Zukunft neue Brennverfahren die Bedeutung von VCR-Systemen weiter erhöhen. Auch bei hochaufgeladenen Dieselmotoren kann die VCR zur weiteren Optimierung der Effizienz verwendet werden [FEV12b].

Zur Realisierung der variablen Verdichtung sind unterschiedliche Konzepte denkbar, wobei der technische Aufwand, die Kosten und das zusätzliche Gewicht häufig sehr hoch sind [WAL11]. Ein Beispiel für eine Realisierung der VCR ist eine exzentrische Kurbelwellenlagerung. Bei dieser kann durch Drehung des Exzenters eine vertikale Änderung der Position des Kurbeltriebs relativ zum Zylinderkopf verursacht werden, wodurch die Verdichtung kontinuierlich verstellt werden kann. Nachteilig zeigen sich jedoch für diese Variante die hohe Komplexität und der hohe Integrationsaufwand in konventionelle Aggregate.

Ein vereinfachtes Konzept stellt die zweistufige variable Verdichtung dar. Trotz der diskreten Funktionsbeschränkung kann ein hoher Anteil des Potenzials von kontinuierlichen Systemen erreicht werden. Das Prinzip der zweistufigen VCR basiert auf einer variablen Länge der Pleuelstangen. Hinsichtlich der Serienfähigkeit der variablen Ventilsteuerung muss ein Konzept ausgewählt werden, welches niedrige Herstellungskosten und eine hohe Integrationsfähigkeit in konventionelle Antriebsarchitekturen aufweist. Dahingehend weist vor allem die zweistufige VCR ein hohes Potenzial auf [FEV12b]. Derzeit befindet die der VCR noch im

Forschungsstadium. Zwar wurden die Möglichkeiten dieser Technologie bereits demonstriert, jedoch müssen die Systeme noch weiter optimiert werden, um von den Herstellern in Fahrzeuge integriert zu werden, siehe Abb. 12-19.



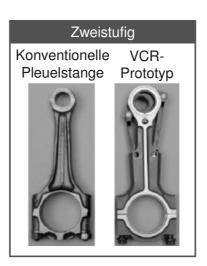


Abb. 12-19: Variable Verdichtung über eine exzentrisch gelagerte Kurbelwelle (links); über Längenvariation der Pleuelstangen (rechts) [FEV12a][FEV12b]

Bei Benzinmotoren wird das Potenzial der variablen Verdichtung mit 7 % angesetzt, bei Dieselmotoren mit 4 %. Dabei fallen Kosten zwischen 500 € und 600 € an.

12.4.1.7 Brennverfahren

Der thermodynamische Wirkungsgrad eines Motors kann auch durch neuartige Brennverfahren verbessert werden. Eine mögliche Technologie stellt hier die homogene Kompressionszündung (HCCI oder CAI) dar, dessen Zielsetzung neben einer Verbrauchssenkung vor allem in der Absenkung von Stickoxid- und Partikelemissionen besteht. Bei der homogenen Kompressionszündung werden Prinzipien des konventionellen Ottomotors, wie ein homogenes Luft-Kraftstoff-Gemisch, mit der selbstständigen Kraftstoffentzündung des Dieselmotors kombiniert [RIC11]. Theoretisch ist ein Betrieb mit Diesel und Benzin vorstellbar, favorisiert wird jedoch der Betrieb mit Benzinkraftstoff aufgrund der höheren Zündwilligkeit der homogenen Kompressionszündung mit Benzin [WAL11]. Schwierig zu bewerkstelligen sind bei diesem Verfahren eine zeitgerechte Zündeinleitung, um Frühzündungen des Gemisches zu vermeiden, und der Wärmefreisetzungsverlauf. Zur Beherrschung dieser Herausforderungen können eine verstärkte Abgasrückführung eingesetzt und das Verdichtungsverhältnis reduziert werden. Häufig basieren HCCI-Konzepte auf der Möglichkeit einer variablen Verdichtung [BOS07].

Die aus dem HCCI-Verfahren resultierenden CO₂-Potenziale können sich nur in einem kleinen Betriebsbereich des Motors auswirken. Diese zusätzliche CO₂-Reduzierung über die benötigten Technologien wie Direkteinspritzung und variable Ventilsteuerung hinaus ist außerdem relativ gering. Zusammen mit diesen Technologien wird das Potenzial der HCCI zwischen 10 und 12 % abgeschätzt. Dabei werden Kosten zwischen 450 und 500 € erwartet. Im

Hinblick auf den Aufwand für die Realisierung im Serienfahrzeug ist eine Einführung vor 2020 als gering einzustufen [RIC11].

Bei Dieselmotoren kann eine sogenannte "closed-loop"-Verbrennungssteuerung das Brennverfahren weiter optimieren. Sensoren im Zylinder geben dabei Daten zum Druck an das Motorsteuergerät weiter, welches daraufhin die Variablen der Verbrennungssteuerung anpasst. Das Potenzial hierfür wird mit 1 % bei Kosten in Höhe von 150 € angesetzt. Derzeitig befindet sich diese Technologie noch im Forschungsstadium [RIC11]

12.4.1.8 Reibungsreduzierung

Die Reibungsverluste im Motor, Getriebe und Antriebstrang eines Fahrzeugs können bezogen auf den Energiegehalt des Kraftstoffes zwischen 10 % und 15 % betragen [ECK10b]. Eine Verringerung dieser Reibung kann daher zu Kraftstoff- und CO₂-Emissionseinsparungen führen. Dazu können eine Vielzahl kleinerer Maßnahmen wie reibungsreduzierende Beschichtungen und eine verringerte Viskosität der Schmierstoffe im Motorgehäuse beitragen [RIC11]. So kann z.B. der Einsatz von Leichtlaufölen, d.h. Schmierölen mit niedriger Kälteviskosität und reibungsmindernden Zusatzstoffen, die Reibung im Motor reduzieren [BOS07].

Außerdem werden in Zukunft technologische Fortschritte bei Komponenten des Ventiltriebs, Kolben, Lagertechnologien und der gesamten Motorkonstruktion dazu führen, dass weniger Verluste durch Reibung im Motor entstehen. Darüber hinaus werden auch Reibverluste im Getriebe und restlichen Antriebsstrangkomponenten weiter reduziert werden können. So kann z.B. durch die Integration verschiedener motorischer Komponenten ein kompakter Bauraum erreicht werden. Dadurch kommt es zu einer schnelleren Erwärmung kommt, was die reibungsintensive Kaltstartphase verkürzt [RIC11].

Das CO₂-Potenzial einer Reibungsreduzierung im gesamten Antriebsstrang, d.h. im Motor, Getriebe und Endantrieb, wird mit 2 % bis 3 % bei Kosten zwischen 50 € und 80 € angesetzt.

12.4.1.9 Reduzierung von thermischen Verlusten

Eine große Menge der im Motor eingesetzten Kraftstoffenergie geht in Form von Wärme verloren. So entweichen 20 % bis 32 % der eingesetzten Energie ungenutzt über das Abgas und 26 % bis 32 % über das Kühlsystem [ECK10b]. Durch Rückgewinnung bzw. Nutzung dieser Energie kann die Effizienz des Verbrennungsmotors gesteigert werden. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, diese Wärme direkt zu verwenden, oder sie in mechanische Energie oder elektrische Energie zu konvertieren, um den Antrieb zu unterstützen oder die Batterie des Fahrzeugs zu laden [SHA10].

Zur Umwandlung der Wärme existieren im Wesentlichen zwei Mechanismen. Über das Prinzip des Dampfprozesses, dem sogenannten Rankine-Zyklus, kann die Wärme in mechanische Energie umgewandelt werden. Der Seebeck-Effekt ermöglicht eine thermoelektrische Konvertierung der Wärme in elektrische Energie [SHA10].

Bei Nutzung des Rankine-Zyklus wird das Prinzip einer zweistufigen Energiewandlung aus modernen Gas- und Heizkraftwerken auf den mobilen Einsatz übertragen. Dabei dient die Wärme des ersten Umwandlungsschrittes im Motor als Energiequelle für einen nachgeschalteten Dampfprozess. Kern des Systems ist ein Wärmetauscher, in welchem ein Arbeitsmedium verdampft, um anschließend eine Expansionsmaschine anzutreiben, siehe Abb. 12-20. Das Verfahren wird bei BMW unter der Bezeichnung Turbostreamer geführt und prognostiziert mögliche Verbrauchsreduzierungen im Kundenbetrieb um 15 % [ATZ12b].



Abb. 12-20: Wärmetauscher (links) und Expansionsmaschine (rechts) des BMW Turbostreamers [ATZ12b]

Ein thermoelektrischer Generator (TEG) nutzt den sogenannten Seebeck-Effekt. Bei diesem wird mit Hilfe eines Temperaturgefälles in thermoelektrischen Halbleiterelementen eine elektrische Spannung erzeugt, siehe Abb. 12-21. Bisher lag der Wirkungsgrad dieser TEGs nur bei wenigen Prozent. Durch Fortschritte im Bereich der Material- und Werkstoffforschung wurden jedoch in den letzten Jahren Fortschritte bei der Leistungsfähigkeit erzielt [ATZ12b].

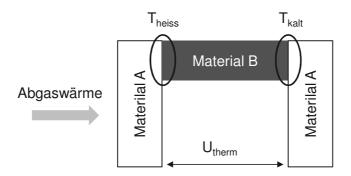


Abb. 12-21: Thermoelektrischer Effekt [In Anlehnung an [BRU10]

Zwar konnte die Wirksamkeit dieser Verfahren bereits demonstriert werden, jedoch befinden sich beide Verfahren noch im Forschungsstadium [RIC11]. Den Technologien zur Wärmeenergierückgewinnung wird eine CO₂-Reduzierung von 2 % zugeschrieben, wobei die langfristig erreichbare Verbrauchsreduzierung deutlich höher liegen kann. Die Kosten für einen
thermoelektrischen Generator sind derzeitig mit ca. 800 € noch relativ hoch. Für die Abgasenergierückgewinnung nach dem Rankine-Prinzip liegen keine Kostenschätzungen vor. Diese dürften jedoch aufgrund des fortgeschrittenen Entwicklungsstadiums deutlich unter dem
thermoelektrischen Generator liegen und wurden mit 400 € abgeschätzt.

Eine weitere grundsätzliche Möglichkeit zur CO₂-Reduzierung im Hinblick auf thermische Verluste ist die Realisierung eines intelligenten Thermomanagements. Dieses hat zum Ziel, Wärmeflüsse optimal zwischen Motor, Getriebe und Innenraum zu verteilen. Besonders in der Kaltstartphase können dadurch die CO₂-Emissionen gesenkt werden, indem, z.B. über getrennte Kühlkreisläufe, verstellbare Kühler-Jalousien und regelbare elektrifizierte Pumpen eine schnellere Aufheizung des Motors erreicht wird. Das intelligente Thermomanagement verfolgt damit die Optimierung von Kraftstoffverbrauch, Klimakomfort im Innenraum, einer erhöhten Komponentenlebensdauer und einer verbesserten Kühlleistung in Teillastzuständen aus Gesamtfahrzeugsicht [BOS10][MOT12]. Zukünftig bietet sich auch eine Isolierung bzw. Kapselung des Motoraums an, um das Temperaturniveau des Antriebsstranges bei Abstellen des Motors aufrecht zu erhalten und so die Kaltstartphase zu verkürzen [ATZ12b]. Dadurch kann zwar keine Verbesserung des Zyklusverbrauchs erreicht werden, dafür jedoch eine Optimierung des realen Kundenverbrauchs. Für das Thermomanagement wird das CO₂-Potenzial mit 2 % bei antizipierten Kosten zwischen 120 € und 150 € angenommen.

12.4.2 Getriebe

Jeder Antriebsmotor wird in einem bestimmten Drehzahlbereich betrieben, in welchem die benötigte Leistung sowie das erforderliche Drehmoment nicht gleichmäßig angeboten werden können und die Maximalwerte nur in einem bestimmten Intervall verfügbar sind. Daher verwendet man Getriebe, um das Drehmoment und die Drehzahl des Motors entsprechend dem Kraftbedarf der Fahraufgabe so zu wandeln, dass die Leistung nahezu konstant bleibt [REI10]. Zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs mittels eines Getriebekonzepts, muss dieses, neben einem hohen mechanischen Wirkungsgrad, eine möglichst hohe Spreizung des Übersetzungsbereichs und ein geringes Systemgewicht aufweisen. Eine höhere Spreizung der Übersetzung bewirkt dabei, dass der Motor näher an seinem effizientesten Betriebspunkt betrieben werden kann [BOS07]. Automatikgetriebe sollten darüber hinaus eine intelligente Schaltstrategie und eine geringe Steuerungsleistung besitzen. Neben dem Kraftstoffverbrauch müssen bei Getrieben auch Anforderungen an den Komfort, den Bauraum, die Fahrbarkeit und die Herstellungskosten berücksichtigt werden [REI10].

Handschaltgetriebe sind die einfachsten und günstigen Getriebe für Kraftfahrzeuge [REI10]. Sie haben in Europa den größten Marktanteil. Aktueller Technikstand sind hier manuelle Getriebe mit 6 Gangstufen im SEG-2 und SEG-3. Im SEG-1 werden hauptsächlich 5 Gang-Schaltungen eingesetzt [ICC11d].

Automatisierte Schaltgetriebe (AST/AMT) sind prinzipiell wie manuelle Getriebe aufgebaut und weisen zur Betätigung von Kupplung und Gangwechsel einen hydraulischen oder elektrischen Steller auf. Dies ermöglicht in Verbindung mit einer elektronischen Regelung das automatisches Anfahren und Schalten. Geeignete Schaltstrategien unterstützen dabei eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen. Automatisierte Schaltgetriebe sind kostengünstiger als andere automatische Systemlösungen und kompakt im Aufbau. Nachteilig wirkt sich die auftretende Zugkraftunterbrechung beim Beschleunigen aus

[BOS07]. Für die Technologieanalyse wird lediglich der Einsatz im SEG-1 erwogen. Hier wird ein Potenzial von 2,5 % bei Mehrkosten von 250 € angenommen.

Das Doppelkupplungsgetriebe (DKG) stellt eine Weiterentwicklung des AST dar. Es ist prinzipiell wie ein manuelles Getriebe aufgebaut, siehe Abb. 12-22. Ein wesentlicher Unterschied zu diesem besteht darin, dass im Gegensatz zum manuellen Getriebe die Hauptwelle in eine Vollwelle und eine umfassende Hohlwelle geteilt ist, welche über zwei separate Kupplungen mit dem Motormoment beaufschlagt werden können.

Auf den Teilwellen sitzt jeweils ein Zahnradsatz für gerade und ungerade Gänge. Am Getriebeeingang ist jede Welle eine Kupplung zugeordnet, so dass beim Schalten immer zwei Gänge eingelegt sind, der aktive und ein benachbarter Gang. Dadurch können Schaltvorgänge schnell und ohne Zugkraftverlust durchgeführt werden. Hinsichtlich des Komforts erreichen sie nahezu das Niveau von Stufenautomaten. Darüber hinaus weisen sie einen sehr guten Wirkungsgrad auf. Im Gegensatz zum AST benötigen sie allerdings einen größeren Bauraum und haben ein höheres Gewicht [REI10]. Derzeit existieren Varianten mit bis zu sieben Gangstufen, z.B. das 7-Gang DKG von Volkswagen. Außerdem wird zwischen Varianten mit nasser und trockener Kupplung unterschieden. Während trockene Kupplungen effizienter sind, können nasse Kupplungen über die Kraftübertragung durch ein Fluid ein höheres Drehmoment übertragen [BOS07].

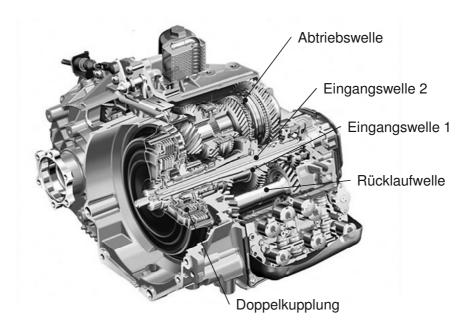


Abb. 12-22: Doppelkupplungsgetriebe in der Schnittdarstellung [Bildquelle: Volkswagen AG]

Dem Doppelkupplungsgetriebe wird gegenüber einem Handschaltgetriebe ein Potenzial von 4 % bis 5 % Kraftstoffeinsparung zugeordnet. Gegenüber einer konventionellen 6-Gang-Automatik können 8 % bis 9 % gespart werden. Während für den letztgenannten Fall keine Mehrkosten anfallen, betragen diese in Bezug auf ein Handschaltgetriebe ca. 500 €. Das

Mehrgewicht eines Doppelkupplungsgetriebes gegenüber einem Handschalter wird mit 2 % veranschlagt.

Automatische Lastschaltgetriebe oder Stufenautomaten (AT) nutzen einen Drehmomentwandler, welcher die Drehzahl und das Drehmoment variieren kann, sowie Planetenradsätze, um verschiedene Übersetzungsverhältnisse bereitzustellen [ECK10a]. Die Leistungsübertragung über den Wandler kann nur stattfinden, wenn zwischen Turbinenrad und Pumpenrad Schlupf auftritt. Dieser bewirkt allerdings einen Leistungsverlust und dadurch erhöhte CO₂-Emissionen. Zur Verringerung der Verluste wird eine Wandlerüberbrückung genutzt, die dann schließt, wenn die Drehzahl- oder Momentenwandlung nicht benötigt wird [REI10]. Die Effizienz von Automatikgetrieben wird in Zukunft verbessert, indem das kinematische Design optimiert sowie eine höhere Anzahl von Gangstufen integriert wird [RIC11]. Beispiele für die Trends bei der Weiterentwicklung von AT-Getrieben sind z.B. die 8-Gang-Automatik von ZF für längs eingebaute Motoren, siehe Abb. 12-23, sowie die sich in der Entwicklung befindliche ZF-9-Gang-Automatik für Quermotoren.

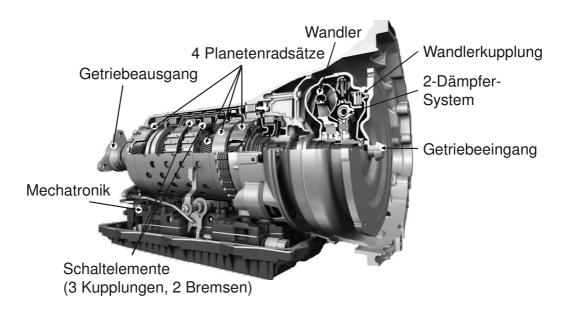


Abb. 12-23: ZF 8-Gang-Automatikgetriebe in der Schnittdarstellung [Bildquelle: ZF Friedrichshafen AG]

Bei diesen Konzepten ermöglicht die höhere Gangzahl eine sehr hohe Getriebespreitzung, wodurch der Motor stets im optimalen Drehzahlbereich gehalten werden kann. Zur Reduzierung der hydraulischen Verluste des Wandlers werden mehrstufige Torsionsdämpfungssystem integriert, welche das Schließen der Wandlerkupplung bereits bei niedrigen Drehzahlen ermöglichen [ZFF11]. Ohne diese Dämpfung würde ein frühes Schließen der Kupplung zu Vibrationen und Geräuschen führen. Eine optimierte Wandlerautomatik mit erhöhter Gangzahl kann in Bezug auf die Referenz im SEG-3 um 7 % CO₂ einsparen. Die zusätzlichen Kosten im Vergleich zur 6-Gang-Automatik des Referenzfahrzeuges im SEG-3 werden mit 100 € abgeschätzt.

Beim stufenlosen Getriebe (CVT) erfolgt eine Variation der Übersetzung stufenlos über Kegelscheiben und einem Gliederband oder einer Kette. Als Anfahrelement dienen ein Wandler oder eine Lamellenkupplung. Alle Funktionen werden elektrohydraulisch gesteuert. Die Vorteile dieses Getriebes sind, dass eine hohe Spreizung der Übersetzung möglich ist und keine Zugkraftunterbrechung bei Schaltvorgängen entsteht. Während die meisten Hersteller bei ihren CVT Getrieben Schubgliederbänder einsetzten, erfolgt bei der Multitronic von Audi der Einsatz von Laschenketten [REI10]. Aufgrund einer höheren Reibung weist das CVT eine geringere Effizienz als das DKG auf. Darüber hinaus wird der im Vergleich mit den anderen Getriebevarianten ungewohnte Fahreindruck von Kunden teilweise als unangenehm empfunden [RIC11]. Gegenüber dem DKG wird das Marktpotenzial in Europa eher gering eingeschätzt.

Dem stufenlosen Getriebe wird gegenüber einem Handschaltgetriebe ein Kraftstoffeinsparpotenzial von 3 % bis 4 % zugeordnet. Gegenüber einer konventionellen 6-Gang-Automatik können 6 % bis 7 % gespart werden. Die Mehrkosten in Bezug auf ein Handschaltgetriebe betragen ca. 600 €. Das Mehrgewicht eines Doppelkupplungsgetriebes gegenüber einem Handschalter wird mit 2 % veranschlagt.

Neben den Möglichkeiten zur CO₂-Reduzierung durch neue Getriebekonstruktionen besteht auch die Möglichkeit ein bestehendes Getriebe weiter zu optimieren. In Kombination mit fortgeschrittenem Downsizing kann durch eine Erhöhung der Übersetzung, der Motorbetriebspunkt hin zu niedrigeren Drehzahlen verschoben werden, da durch die Aufladung bei niedrigeren Drehzahlen bereits ein hohes Drehmoment anliegt. Durch dieses sogenannte Downspeeding werden Bereiche eines niedrigeren spezifischen Kraftstoffverbrauchs erreicht. Diese Maßnahme kann bei geringen Kosten von ca. 30 € eine CO₂-Einsparung von 2 % bis 3 % erreichen.

Der Gesamtanteil der verschiedenen Automatikgetriebe an den Neuzulassungen in der EU betrug 2010 12 %. Im Ländervergleich wies dabei Deutschland mit 20 % den größten Automatikanteil auf [ICC11d].

12.4.3 Elektrifizierung des Antriebsstrangs

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs beschreibt die zunehmende Elektrifizierung von Antriebskomponenten im Kraftfahrzeug, beginnend bei einer Start-Stopp-Funktion bis hin zu einem rein elektrischen Antrieb, siehe Abb. 12-24.

Die elektrische Leistung und das Spannungsniveau steigen mit dem Grad der Hybridisierung an. Dabei kann mit zunehmendem Grad der Elektrifizierung des Antriebsstrangs der Kraftstoffverbrauch bzw. die CO₂-Emission reduziert werden. Im Folgenden werden zuerst Hybridfahrzeuge beschrieben und anschließend die Eigenschaften von rein elektrisch betriebenen Elektrofahrzeugen erläutert.

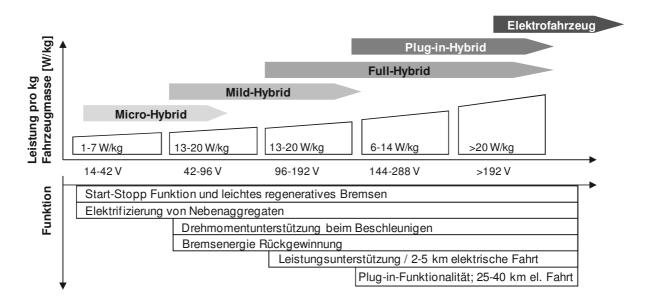


Abb. 12-24: Elektrifizierung des Antriebsstrangs

12.4.3.1 Hybridantrieb

Hybridfahrzeuge (HEV) verwenden als Fahrzeugantrieb neben einem Verbrennungsmotor auch mindestens eine E-Maschine, die als Motor oder Generator betrieben werden kann, und einen Energiespeicher zur Speicherung elektrischer Energie [REI10]. Es existieren verschiedene Antriebskonfigurationen, die Mechanismen zur CO₂-Reduzierung unterschiedlich nutzen und verschiedene Optimierungsstrategien verfolgen.

Dabei lässt sich eine Einteilung nach Grad der Hybridisierung und der Antriebsstrang-Topologie vornehmen, vgl. Abb. 12-24. Bei den Hybridisierungsgraden kann zwischen "Micro", "Mild" und "Full-Hybrid" unterschieden werden, welche, abhängig vom Grad der Elektrifizierung, wachsende Einsparpotenziale zu steigenden Kosten ermöglichen. Der Antriebsstrang kann dabei grundsätzlich parallel, seriell oder leistungsverzweigt angeordnet werden.

Der Micro-Hybrid beinhaltet eine Start-Stopp-Funktion und die Möglichkeit zum leichtem regenerativen Bremsen, wobei die Bremsleistung durch die Leistung des Starter-Generators begrenzt ist [TNO11]. Die Start-Stopp-Funktion ermöglicht das automatische Abstellen des Motors im Stillstand sowie das verzögerungsfreie Anlassen zur Weiterfahrt, sodass in diesem Zeitraum anfallende Emissionen eingespart werden können. Eine Start-Stopp Funktion kann auch separat realisiert werden, wobei dann allerdings nicht mehr von einer Hybridisierung gesprochen werden kann. Die Änderungsumfänge des Micro-Hybrids umfassen neben einem verstärkten Starter-Generator und einer angepassten Motorsteuerung eine zyklenfeste Batterie. Diese muss im Stillstand in der Lage sein, Nebenaggregate, wie Licht oder Klimakompressor, zu betreiben [REI10]. Diese Technologie kann den CO₂-Ausstoß im Zyklus um 6 % bis 7 % reduzieren. Die Mehrkosten betragen dabei zwischen 350 € und 425 € bei einer Gewichtszunahme von ca. 0,5 %.

Der Mild-Hybrid bietet darüber hinaus die Möglichkeit des regenerativen Bremsen und der Drehmoment-Unterstützung des Verbrennungsmotors. Der benötigte Energiespeicher muss hierzu eine Leistung bereitstellen, welche hauptsächlich zum Anfahren und Beschleunigen bei niedrigen Drehzahlen benutzt wird. Der Mild-Hybrid wird als Parallelhybrid mit einer Kupplung (P1-HEV) realisiert, siehe Abb. 12-25 [BOS07], und benötigt ein Traktionsspannungsnetz mit einer erhöhten Spannungslage, einen Energiespeicher und eine E-Maschine [REI10]. Das Einsparpotenzial dieser Technologie liegt zwischen 9 % und 13 % zu Kosten von 1.400 € bis 1.500 €. Das Fahrzeuggewicht erhöht sich dabei schätzungsweise um 3 %.

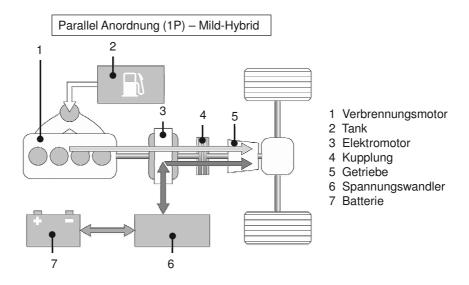


Abb. 12-25: Mild-Hybrid in paralleler Anordnung mit einer Kupplung (P1-HEV) [REI10]

Die parallele Hybrid-Antriebsstrangtopologie zeichnet sich grundsätzlich dadurch aus, dass eine rein mechanische Kraftübertragung zur Antriebsachse ermöglicht wird, was im Vergleich zu anderen Antriebskonfigurationen einen höheren Gesamtwirkungsgrad zur Folge hat. Allerdings wirkt sich dies nachteilig auf die Wahl des Betriebspunkt des Verbrennungsmotors aus. Das Drehmoment der E-Maschine addiert sich beim parallelen Hybriden zum Verbrennungsmotor und kann frei variiert werden.

Der Full-Hybrid ist gegenüber dem Mild-Hybrid fähig kleinere Distanzen rein elektrisch zu fahren. Er kann sowohl als paralleler Hybrid mit zwei Kupplungen (P2-HEV), als auch mit serieller Anordnung oder als leistungsverzweigter Hybrid realisiert werden, siehe Abb. 12-26 [BOS07].

Bei Konfiguration als paralleler Hybrid mit zwei Kupplungen wird eine E-Maschine benötigt. Eine Sonderform der parallelen Anordnung im Full-Hybrid ist die Aufteilung der beiden Aggregate auf die Fahrzeugachsen. Die Zugkraftaddition erfolgt dann über die Straße, wobei auch eine Allradfunktionalität ermöglicht wird [REI10]. Der Fahrzeughersteller PSA verfolgt dieses Konzept z.B. mit dem Peugeot 3008 Hybrid4 oder dem Citroën DS5 Hybrid4.

Bei Anordnung als serieller Hybrid sind dagegen zwei E-Maschinen erforderlich, die in Reihe mit dem Verbrennungsmotor geschaltet werden. Der Verbrennungsmotor ist dabei nicht mechanisch mit der Antriebsachse verbunden. Zu Beginn wird die Bewegungsenergie des Verbrennungsmotors durch einen Generator in elektrische Energie umgesetzt. Ein Spannungswandler wandelt die anfallende elektrische Leistung gemäß dem Bedarf und speist die als primäres Antriebsaggregat betriebene zweite E-Maschine auf der Abtriebsachse mit Energie. Der wesentliche Vorteil dieser Anordnung besteht darin, dass der Betriebspunkt für den Verbrennungsmotor im Hinblick auf Effizienz frei gewählt werden kann. Nachteilig wirken sich dagegen die Wirkungsgradverluste aufgrund der mehrfachen Energieumwandlung aus [BOS07][REI10]. Abb. 12-26 stellt den parallelen Full-Hybrid dem Seriellen gegenüber.

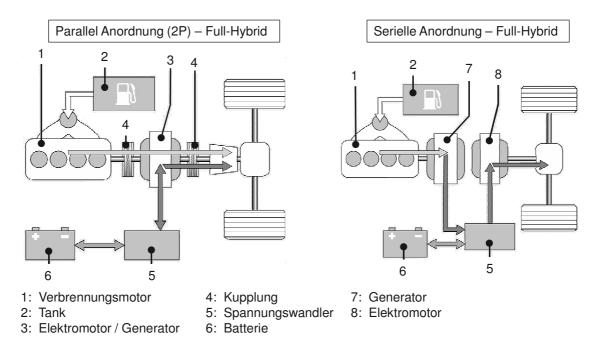


Abb. 12-26: Full Hybrid in paralleler Anordnung mit zwei Kupplungen (links) und in serieller Anordnung (rechts) [REI10]

Eine Kombination aus beiden Varianten wird durch das sogenannte leistungsverzweigte System dargestellt, siehe Abb. 12-27. Die Struktur des leistungsverzweigten Hybriden beinhaltet als Kernelement ein Planetengetriebe. Die Leistung des Verbrennungsmotors wird dabei über das Planetengetriebe auf zwei Pfade, einen mechanischen und einen elektrischen, aufgeteilt. Neben dem mechanischen Pfad zwischen Verbrennungsmotor und Abtrieb, existiert ein elektrischer Pfad, indem eine E-Maschine an das Planentengetriebe gekoppelt wird. Durch diese können Drehzahl und Last des Verbrennungsmotors an die Fahranforderungen angepasst werden. Da die dabei anfallende elektrische Leistung nicht immer sinnvoll im Energiespeicher gespeichert werden kann, wird der elektrische Pfad durch eine zweite E-Maschine auf der Antriebsachse geschlossen. Bei einer Fahranforderung wird also der Verbrennungsmotor bei seiner Vorzugsdrehzahl betrieben, die durch die erste E-Maschine, auf das Planentengetriebe wirkend, eingestellt wird. Das gewünschte Moment wird dann vom

Verbrennungsmotor aus zum Teil über den mechanischen und zum Teil über den elektrischen Pfad zum Rad übertragen.

Leistungsverzweigten Hybride kombinieren die grundlegenden Prinzipien des seriellen und parallelen Hybrids. Ein großer Vorteil liegt außerdem in der damit realisierten stufenlos einstellbaren Übersetzung (CVT). Nachteilig wirken sich die erforderlichen Energieumwandlungen bei der Leistungsverzweigung auf dem Gesamtwirkungsgrad aus, wenn das Fahrzeug über einen großen Geschwindigkeitsbereich eingesetzt werden soll. Daher wurden sogenannte Two-Mode-Getriebe entwickelt, die über zwei Fahrbereiche verfügen, aber durch hohe Kosten und eine hohe Komplexität des Systems gekennzeichnet sind [BOS07][REI10].

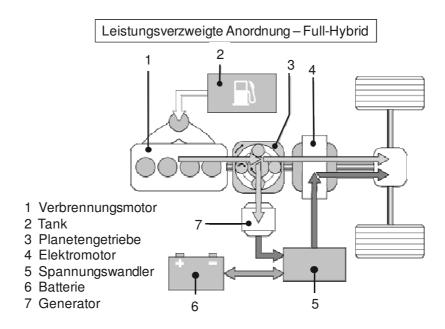


Abb. 12-27: Full-Hybrid in leistungsverzweigter Anordnung [REI10]

Hinsichtlich der Bewertung von Potenzialen und Kosten werden die unterschiedlichen Ausführungsformen des Full-Hybrid zusammengefasst und mit einem CO₂-Potenzial zwischen 22 % und 25 % abgeschätzt. Die Kosten belaufen sich auf 2.400 € bis 3.000 € und das Fahrzeuggewicht erhöht sich um ca. 8 %.

Darüber hinaus ist es möglich, Full-Hybride unabhängig von der Antriebsstrangkonfiguration als so genannte Plug-in-Hybride (PHEV) zu gestalten. Diese ermöglichen es, den Energiespeicher extern über ein Ladegerät aufzuladen. Die Bauform eines Plug-in-Hybrid mit serieller Antriebskonfiguration wird auch als Range-Extender HEV bezeichnet [REI10]. Plug-in-Hybride werden im Rahmen der Technologiebewertung der Kategorie Elektrofahrzeuge untergeordnet, da mit ihnen ein rein elektrischer Betrieb unter ausschließlich externer Stromversorgung möglich ist. Außerdem werden die Kosten im Zeithorizont bis 2020 noch zu hoch eingeschätzt, um größere Marktanteile einzunehmen. Sie fließen daher nur im Rahmen des im EU-Trend-Szenario angenommenen Marktanteils für Elektrofahrzeuge in 2020 von 6 % in die Berechnung eines CO₂-Flottenwerts für 2020 ein.

Durch die Möglichkeiten der Hybridfahrzeuge, den Betriebspunkt des Verbrennungsmotors auf einen kleinen Bereich einzuschränken, müssen für Hybridfahrzeuge u.U. andere Optimierungskonzepte als bei konventionellen Verbrennungsmotoren verfolgt werden. So kann z.B. der sogenannte Atkinson-Zyklus angewendet werden. Dieser wird dadurch charakterisiert, dass die Einlassventile während des Beginns des Verdichtungstaktes offen bleiben. Dadurch wird die effektive Kompressionsrate gesenkt, aber die effektive Expansionsrate erhöht. Dies reduziert den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen, aber verringert das verfügbare Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen. Der Atkinson-Zyklus findet typischerweise in Hybridfahrzeugen Anwendung, da das resultierende schwache Drehmoment durch die E-Maschine zeitweise kompensiert werden kann [RIC11].

Die Entscheidung eines Herstellers für eines der verschiedenen Hybridsysteme wird unter Abwägung von CO₂-Reduzierungspotenzial, entstehenden Kosten und der Systemkomplexität getroffen. Es wird erwartet, dass sich auf Grund unterschiedlicher Entwicklungsstrategien mehrere Varianten auf dem Markt durchsetzten werden, zwischen denen der Kunde auswählen kann [RIC11]. 2010 betrug der Anteil von Hybridfahrzeugen 2010 an den Neuzulassungen 0,37 % in Deutschland und 0,6 % in Europa [KBA11][ICC11d].

12.4.3.2 Elektrofahrzeuge

Dem rein elektrischen Fahrzeugantrieb in Form von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) wird eine große Bedeutung zur langfristigen Reduzierung der lokalen CO₂-Emissionen im Individualverkehr zugesprochen. Dadurch, dass Elektrofahrzeuge einen lokal emissionsfreien Betrieb ermöglichen, bieten diese unter der Voraussetzung regenerativ erzeugter Energien hierzu ein hohes Potenzial, insbesondere in urbanen Räumen.

Die elektrische Energie wird dabei über einen Energiespeicher mit hohem Energiegehalt geliefert, welcher über das Stromnetz extern aufgeladen werden muss. Als Batterietyp kommen aufgrund ihrer Eigenschaften hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte derzeit vor allem Lithium-Ionen-Batterien in Frage [WAL11]. Beim batteriebetriebenen Elektrofahrzeug verschiebt sich eine Bilanzierung der CO₂-Emissionen zur Primärenergie-Bereitstellung, so dass die Effizienz der Stromerzeugung ausschlaggebend ist. Die Schlüsseltechnologie zum Durchbruch der Elektromobilität ist der Energiespeicher, da derzeitig realisierbare Energiedichten nur geringe Reichweiten zulassen. Daher wird sich der Einsatz dieser Fahrzeuge kurz- und mittelfristig auf urbane Gebiete konzentrieren [LAU09]. Nach der derzeitig gültigen Richtlinie zur Messung von CO₂-Emissionen, wird der Strommix bei Elektrofahrzeugen nicht berücksichtigt, so dass formal keine CO₂-Emissionen beim Betrieb entstehen.

Zur Erzielung von vergleichbaren Reichweiten mit Benzin oder Diesel bietet sich langfristig der Einsatz von Wasserstoff in Kombination mit einer Brennstoffzelle an. Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Wandler, in welchem der Energieträger Wasserstoff mit dem Sauerstoff aus der Luft in einer kalten Verbrennung reagiert. Dabei entsteht Strom, der zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt werden kann [REI10]. Brennstoffzellenfahrzeuge können ebenfalls als Elektrofahrzeuge aufgefasst werden. Ihr Antrieb ist rein elektrisch und die Brenn-

stoffzelle stellt in Kombination mit dem Wasserstofftank einen Energiespeicher dar. Derartige Fahrzeugkonzepte befinden sich noch im Forschungsstadium und werden voraussichtlich erst nach 2020 eine nennenswerte Rolle spielen.

Äquivalent zu Plug-in-Hybriden werden Elektrofahrzeuge im Rahmen eines geschätzten Marktanteils 2020 von 6 % berücksichtigt und fließen auf diese Weise in die Berechnung eines CO₂-Flottenwerts für 2020 ein. Abb. 12-28 zeigt die verwendeten Antriebskonfigurationen für Elektrofahrzeuge und Plug-in-Hybride in 2020 [TNO11].

Antriebskonfigurationen als Referenz für die Elektromobilität 2020							
Fahrzeugreferenz Eigenschaften	SEG-1	SEG-2/-3					
Antrieb	BEV	PHEV					
Energiequelle	Strom	Benzin/Diesel* + Strom					
elektrische Antriebsleistung (Nennleistung)	62 kW	30 kW					
Batteriekapazität	16 kWh	6,3 kWh					
elektrische Reichweite	150 km	50 km					
Fahrzeugmasse	1.055 kg	1.487 kg					
CO ₂ (NEFZ)	0 g/km	34 g/km					
Mehrkosten	8.960 € (TNO) ~ 11.000 € (ika/fka)	7.027 € (TNO) ~ 5.000 € (ika/fka)					

^{*} Benzin/Diesel Konfiguration gemittelt

Abb. 12-28: Referenz-Antriebskonfigurationen von Elektrofahrzeugen (BEV) und Plug-in-Hybriden (PHEV) in Europa für 2020 [Datenquelle: [TNO11]]

So werden entsprechend der Schätzung der deutschen Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) Batterie-Elektrofahrzeuge vor allem im SEG-1 erwartet. Plug-in-Hybride werden dagegen mehrheitlich Anteile im SEG-2 und SEG-3 einnehmen. Deutlich werden in der Tabelle nochmals die Unterschiede zwischen Hybridfahrzeugen und reinen Elektrofahrzeugen im Hinblick auf den elektrischen Traktionsantrieb sowie die Kapazität der benötigten Batterie. Dadurch bedingt, erreicht ein BEV zwar eine höhere elektrische Reichweite, verursacht aufgrund der größeren Batterie trotz geringerer Systemkomplexität die höheren Mehrkosten.

12.4.4 Reduzierung des Energiebedarfs von Nebenverbrauchern

Neben der Energie zur Überwindung der Fahrwiderstände muss das Antriebsaggregat zusätzliche Energie für Nebenverbraucher bereitstellen. Eine Erhöhung der Effizienz dieser Nebenverbraucher führt folglich zu einer CO₂-Reduzierung.

Traditionell werden die Nebenaggregate eines Motors mechanisch angetrieben. Zu ihnen gehören der Generator, welcher Energie für elektrische Verbraucher im Fahrzeug erzeugt, Kühlwasser- und Ölpumpen. Eine Elektrifizierung dieser Komponenten ermöglicht eine bedarfsgerechte Steuerung, bei der die Komponenten nur Energie konsumieren, wenn sie benötigt wird [EPA10b]. So kann beispielsweise bei kalten Temperaturen oder in der Warmlaufphase die Kühlwasserpumpe und der Kühlerlüfter abgeschaltet werden. Neben der direkt eingesparten Energie ergeben sich auch Synergien im Bereich des Thermomanagements, siehe Kap. 12.4.1.9.

Auch die hydraulische Servolenkung ist eine Komponente, welche über den Keilriemen Leistung vom Motor abzweigt. Selbst wenn keine Betätigung der Lenkung erfolgt, wird bei einer hydraulischen Servolenkung durch die Hydraulikpumpe Öl in das Aktuatorsystem der Lenkung gepumpt. Durch Nutzung einer elektrischen Servolenkung kann dieses System ebenfalls bedarfsgerecht gesteuert werden [EPA10b]. Im Rahmen dieser Studie wird allerdings angenommen, dass die elektrische Servolenkung bereits den Standard bei EU-Neuzulassungen in 2010 darstellt.

In der Regel wird auch der Klimakompressor einer Klimaanlage über den Keilriemen mit Energie versorgt. Effizientere Klimaanlagen helfen dabei, diesen Energiebedarf zu reduzieren und können darüber hinaus über klimafreundlichere Kältemittel ihre treibhausfördernde Wirkung weiter reduzieren [SHA10]. Die Wirkung von effizienteren mobilen Klimaanlagen kann im NEFZ jedoch nicht nachgewiesen werden, da alle Nebenverbraucher laut ECE Regelung Nr. 101 ausgeschaltet sind. Sie wird aber als Teil des integrierten Ansatzes der europäischen Strategie im Rahmen der 10 g CO₂/km Regelung angerechnet.

Aufgrund einer Zunahme der Zahl elektrischer Verbraucher im Fahrzeug für Komfort, Unterhaltungs- und Sicherheitssysteme, erhöhen sich die Anforderungen an die Energieverfügbarkeit im Fahrzeug. Zum einen können effizientere Generatoren mit Wirkungsgraden bis zu 75 % zum Einsatz kommen. Zum anderen lässt sich dieser Herausforderung mit einem intelligenten Energie- und Batteriemanagement begegnen, welches über ein eigenes Steuergerät und entsprechender Sensorik den Energieverbrauch des gesamten Fahrzeugs überwacht und bedarfsgerecht regelt. Hier können z.B. ein intelligenter Betrieb von Klima- und Heizsystemen, eine bedarfsgerechte Anpassung der Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors oder auch eine Rekuperationsfunktion des Fahrzeugs einen Beitrag zur Reduzierung von CO_2 -Emissionen leisten [PFA11].

Langfristig bietet auch eine effizientere Fahrzeugbeleuchtung einen möglichen Ansatzpunkt, wobei deren Wirkung nicht im NEFZ nachweisbar ist. Sogenannte Licht emittierende Dioden (LED) können im Vergleich zu Halogen-Leuchtmitteln 2 bis 3 g CO₂/km einsparen. Während ihre Anwendung als Brems-, Rück-, oder Tagfahrleuchte bereits bekannt ist, ist der Einsatz als Vollscheinwerfer relativ neu. Bislang ist die Marktdurchdringung auf wenige einzelne Fahrzeuge in den oberen Segmenten beschränkt. Bei sinkenden Kosten wird diese Technologie jedoch in Zukunft an Bedeutung gewinnen [PRE11][SHA10].

Zwecks Technologieanalyse wird für die Elektrifizierung der Nebenaggregate ein CO₂-Potenzial von 3 % bei Kosten zwischen 130 € und 170 € angesetzt.

12.4.5 Alternative Kraftstoffe im Verbrennungsmotor

Neben neuen Technologien und Antriebskonzepten werden auch Ansätze verfolgt, über alternative Kraftstoffe im Verbrennungsmotor CO₂ einzusparen, wobei hier auch andere Beweggründe wie die Versorgungssicherheit eine Rolle spielen. Grundsätzlich werden unter alternativen Kraftstoffen alle Kraftstoffe verstanden, die eine Alternative zum Betrieb mit konventionellen Benzin- und Dieselkraftstoffen darstellen. Diese Kraftstoffe können entsprechend ihrer Herstellungspfade den ursprünglichen primären Energieträgern zugeordnet und kategorisiert werden, siehe Abb. 12-29.

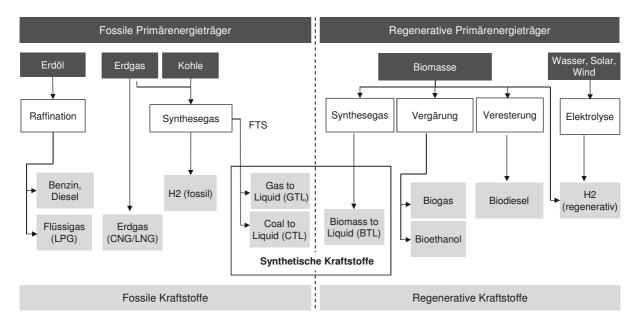


Abb. 12-29: Übersicht der Herstellungspfade fossiler und regenerative Kraftstoffe [In Anlehnung an [REI10]]

Auf der Primärenergieebene lassen sich fossile und regenerative Energieträger unterscheiden, aus welchen die Kraftstoffe auf verschiedenen Herstellungspfaden hergestellt werden. Erdgas, Kohle und Erdöl sind dabei natürlich vorkommende fossile Energieträger. Zu den regenerativen, d.h. erneuerbaren, Energiequellen zählen Biomasse sowie Wasser-, Solarund Windenergie [BOS07][REI10].

Gasförmiges und flüssiges Erdgas (CNG/LNG), Flüssiggas (LPG), Wasserstoff sowie flüssige synthetische Kraftstoffe (GTL/CTL) stellen die fossilen alternativen Kraftstoffe dar. Die aus Biomasse hergestellten Kraftstoffe Biodiesel, Ethanol, Biogas, und flüssiger synthetischer Kraftstoff (BTL) zählen zu den regenerativen Kraftstoffen. Ebenfalls regenerativ erzeugt werden kann Wasserstoff aus Wind, Wasser oder Solarenergie. Die Kraftstoffe, die ein mögliches CO₂-Reduzierungspotenzial besitzen, werden nachfolgend beschrieben [REI10].

Erdgas ist ein alternativer Kraftstoff für den Ottomotor und besteht hauptsächlich aus Methan. Er ist weltweit verfügbar und kann durch relativ geringen Aufwand als Kraftstoff aufbereitet werden. Üblich ist aufgrund des geringeren Energieaufwands die gasförmige Speicherung (CNG) [BOS07]. Aufgrund des niedrigen Kohlenstoffanteils entstehen beim Betrieb mit Erdgas ohne weitere Optimierung im Vergleich zu Benzin betriebenen Ottomotoren ca. 20 % weniger CO₂-Emissionen. Außerdem fallen weniger Schadstoffemissionen an. Methan kann auch als Biogas regenerativ aus Biomasse gewonnen werden. Erdgas eignet sich gut zur Turboaufladung und ermöglicht durch eine hohe Klopffestigkeit eine hohe Verdichtung. Derzeit sind bereits zahlreiche Erdgasfahrzeuge auf dem Markt erhältlich [REI10].

Flüssiggas (LPG), auch Autogas genannt, fällt als Nebenprodukt bei Raffinerieprozessen an und kommt ebenfalls in Ottomotoren zur Anwendung. Aufgrund des geringeren Kohlenstoffanteils fallen bei der Verbrennung im Vergleich zu Benzin 10 % weniger CO₂-Emissionen an [BOS07]. Neben dem Angebot von Fahrzeugvarianten mit LPG-Betrieb vom Hersteller selbst, besteht auch die Möglichkeit der Nachrüstung einer LPG-Anlage für Ottomotoren. Im Jahr 2010 hatten CNG- und LPG betriebene Fahrzeuge in der EU zusammen einen Marktanteil von ca. 3 %. Daran hatten besonders die Kleinst- und Kleinwagen einen hohen Anteil. So fuhren ca. 5 % der Neuzulassungen des SEG-1 in Europa 2010 mit CNG oder LPG [ICC11d].

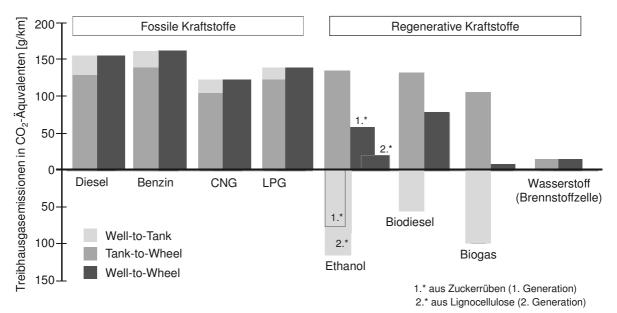
Bioethanol stellt den weltweit meist produzierten Biokraftstoff für Ottomotoren dar und kann aus zucker- und stärkehaltigen Produkten erzeugt werden. Der größte Produzent ist Brasilien, wo eine große Anzahl von Fahrzeugen mit einem Ethanolanteil von 85 % betrieben wird. In Europa wurde 2011 mit E10 ein Kraftstoff mit Ethanolanteil von 10 % eingeführt. Technisch ist es möglich sogenannte Flexfuel-Fahrzeuge zu realisieren, die mit jeder beliebigen Mischung von Ottokraftstoff und Ethanol betrieben werden können. Aufgrund der Konkurrenz zur Nahrungsmittelversorgung werden hohe Biokraftstoffquoten zunehmend kritisch gesehen. Einen Ausweg bietet ein Herstellungsverfahren der zweiten Generation aus Lignocellulose, bei der die ganze Pflanze bzw. auch Pflanzenreste verwendet werden können. Dieses Verfahren ist bisher allerdings noch nicht komplett ausgereift [REI10]. 2010 fuhr weniger als 1 % der Neuzulassungen in Europa mit Ethanol [ICC11d].

Biodiesel oder Fettsäuremethylester (FAME) wird als alternativer Dieseltreibstoff eingesetzt und kann aus Pflanzenölen oder tierischen Fetten hergestellt werden. Während in Europa vorwiegend Rapsöl eingesetzt wird, erfolgt die Herstellung in Nord- und Südamerika meist aus Sojaöl. Reiner Biodiesel (B100) wird nur in Nutzfahrzeugen eingesetzt. Im Pkw-Bereich ist es dagegen aus motorischer Sichtweise sinnvoller Biodiesel als Beimischung, d.h. im "Blend", einzusetzen. Dabei erfolgt in Europa eine Beimischung von maximal 7 %. Bei zu hohen Biodieselgehalten kann es zu einem starken Eintrag des Kraftstoffes in das Motoröl kommen, so dass verkürzte Ölwechselintervalle nötig werden [REI10][BOS07].

Synthetische Kraftstoffe wie GTL, CTL und BTL bilden einen Ersatz für Dieselkraftstoff. Dabei wird ein grundlegend neuer Ansatz zur Herstellung von Kraftstoffen angewandt, da der Kraftstoff hier aus einzelnen chemischen Bausteinen neu aufgebaut wird. Hierzu wird über das katalytische Verfahren der Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) ein aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff bestehendes Synthesegas, in Dieselkraftstoff umgewandelt. Dabei kann über die Wahl der Katalysatoren die Kraftstoffzusammensetzung beeinflusst werden. Synthetische Kraftstoffe erzielen allerdings die höchste Emissionsminderung, wenn sie als Blend-Komponente beigemischt werden. Aufgrund der hohen Kosten bei der Herstellung ist die Anwendung sehr begrenzt. Eine wirksame Verringerung der CO₂-Emissionen im Pkw kann nur durch den Einsatz von BTL-Kraftstoffen erreicht werden, welche aus Biomasse hergestellt werden. Derzeit ist BTL noch nicht auf dem Markt verfügbar [REI10][BOS07].

Bei der Verbrennung von Wasserstoff im Ottomotor fallen lokal keine CO₂-Emissionen an. Wasserstoff bietet sich jedoch nur als alternativer Kraftstoff zur CO₂-Reduzierung an, wenn dieser aus Biomasse oder mit Hilfe von regenerativen Energien durch Elektrolyse hergestellt wird. Der Wirkungsgrad eines Wasserstoffverbrennungsmotors ist in der Regel höher als der eines Benzinmotors. Er ist jedoch niedriger, als bei der Nutzung des Wasserstoffes in einem Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug [REI10][BOS07].

Zur ökologischen Bewertung eines Kraftstoffes müssen über die sogenannte Well-to-Wheel-Analyse nicht nur die Emissionen bei der Speicherung und Verbrennung, also die Bilanzierung zwischen dem Tank und den Rädern (Tank-to-Wheel), sondern auch bei der Herstellung und Verteilung des Kraftstofffes (Well-to-Tank) berücksichtigt werden. Das führt z.B. dazu, dass bei Kraftstoffen aus Biomasse das beim Wachstum der Pflanzen aufgenommene CO₂ gegen die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen aufgerechnet werden darf [BOS07]. Abb. 12-30 veranschaulicht, dass bei ganzheitlicher Betrachtungsweise eine CO₂-Reduzierung vor allem mit Hilfe regenerativer Kraftstoffe erreicht werden kann. Besonderes Potenzial weisen Biogas und regenerativ erzeugter Wasserstoff zur Verwendung in einer Brennstoffzelle auf.



Hinweis: Die Angaben beziehen sich auf ein Referenzfahrzeug, welches dem Technikstand 2010 entspricht

Abb. 12-30: Treibhausgase von Kraftstoffen in CO₂-Äquivalenten [REI10][JRC07]

Die Potenziale der alternativen Kraftstoffe hängen außerdem davon ab, zu welchen Kosten und in welchem Umfang, die für die Herstellung benötigten Energieträger verfügbar sind. Eine weitere Rolle spielen auch legislative Rahmenbedingungen, z.B. steuerliche Vergünstigungen oder Quotenregelungen, sowie das Vorhandensein einer Betankungsinfrastruktur [REI10]. Eine detaillierte Potenzial- und Kostenbewertung von Kraftstoffen ist höchst komplex, wissenschaftlich strittig und soll im Rahmen dieser Studie nicht weiter durchgeführt werden. Für die Kraftstoffverteilung im Szenario für 2020 wird davon ausgegangen, dass der Anteil sonstiger Kraftstoffe wie CNG und LPG annähernd konstant bleibt. Äquivalent zur Aussage der Europäischen Kommission wird jedoch angenommen, dass u.a. über die verstärkte Nutzung und Beimischung von Biokraftstoffen eine Reduzierung der EU-Flottenemissionen von 10 g CO₂/km erreicht werden kann, siehe Kapitel 3.2.1.1.

12.5 Sonstige Maßnahmen und Ökoinnovationen

Neben den bisher vorgestellten Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung existieren auch eine Reihe technischer Maßnahmen, die zwar zu einer Senkung der CO₂-Emissionen im realen Alltagsgebrauch des Kraftfahrzeuges führen, jedoch nicht die NEFZ relevanten CO₂-Emissionen reduzieren können, welche die Grundlage der legislativen Regelungen darstellen.

Daher wurde den Herstellern bis zum Inkrafttreten eines neuen Verfahrens gestattet, die Integration solcher Maßnahmen ins Fahrzeug als Ökoinnovationen mit einer Reduzierung der Flottenemissionen um bis zu 7 g CO₂/km anrechnen lassen. Allerdings müssen hierzu die in Kapitel 3.2.1 genannten Bedingungen erfüllt sein. Von der Industrie werden als Beispiele für mögliche Ökoinnovationen LED-Vollscheinwerfer, Tempomaten, Solar-Glasdächer oder "eco-mode"-Getriebe genannt [BMU09]. Letzteres stellt ein spezielles Fahrprogramm für Automatikgetriebe dar, welches früher in einen höheren Gang schaltet und dadurch Kraftstoff spart. Denkbar ist außerdem eine Bedienmöglichkeit zur Anpassung der Gaspedalkennlinie, um auf Fahrerwunsch einen verbrauchsgünstigen Fahrbetrieb zu fördern. Viele dieser Maßnahmen dienen der Unterstützung des Fahrers im Hinblick auf das sogenannte "Eco-driving" Und sind bereits bei BMW in Form eines speziellen Fahrmodus realisiert.

Teilweise werden nicht zyklusrelevante verbrauchsreduzierende Maßnahmen auch von der EU vorgeschrieben, z.B. Gangwechselanzeigen, Reifendruckkontrollsysteme oder effizientere Klimaanlagen. Diese werden folglich nicht im Rahmen der Ökoinnovationen anerkannt. Beispielsweise schreibt die Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates Gangwechselanzeigen für Handschaltgetriebe vor. Diese sollen dem Fahrer mit Hilfe eines optischen Signals anzeigen, wann dieser im Hinblick auf die Kraftstoffeffizienz den Gang wechseln sollte. 2012 ist diese für alle neu typisierten Fahrzeugmodelle Pflicht, für Neuwagen ab 2014. Durch diese Maßnahme sollen nach Angaben der Kommission bis zu 6 % der CO₂-Emissionen im realen Fahrbetrieb eingespart werden können [EUR09]. Viele dieser Maßnahmen können unter dem Stichwort "Eco-driving" zusammengefasst werden. Eco-driving kennzeichnet somit die Möglichkeit eines Fahrers, den Kraftstoffverbrauch und

damit die CO₂-Emissionen seines Fahrzeugs über eine Anpassung der Fahrweise signifikant zu beeinflussen [SHA10].

12.6 Erfahrungsraten

Als Erfahrungsrate wird der Zusammenhang zwischen sinkenden Stückkosten und der Erhöhung der Ausbringungsmenge bezeichnet. Generell gibt es verschiedene Begründungen für die Reduktion der Stückkosten. Dazu unterscheidet man dynamische und statische Lernund Skaleneffekte [BAU86].

Zu den dynamischen Effekten zählt der **Lernkurveneffekt**, welcher auf Lernprozesse in der objektbezogenen und dispositiven Arbeit zurückzuführen ist. Das Ergebnis sind sinkende Lohnstückkosten bei steigendem kumuliertem Produktionsvolumen.

Dahingegen zählt der technische Fortschritt zu den **dynamischen Skaleneffekten**, wobei durch Innovationen, z.B. in der Verfahrenstechnik, die Produktion weiterentwickelt und effizienter gestaltet wird. Rationalisierungseffekte, wie Standort- und Betriebsgrößenoptimierung, ergonomische Arbeitsgestaltung, sowie betriebliche Aus- und Weiterbildung komplettieren die dynamischen Skaleneffekte.

Zu den **statischen Skaleneffekten** zählen die Fixkostendegression und Betriebsgrößeneffekte (Economies of Scale). Ersteres resultiert aus der Kostensenkung durch verbesserte Kapazitätsauslastung, während die Betriebsgrößeneffekte auf Vorteile beim Einkauf von Rohstoffen sowie Marktmacht abzielen. [ZÄP00]

Die Formel zur Abschätzung der Herstellungskosten unter Berücksichtigung von Erfahrungsraten ist unter Gl. 12-1 dargestellt [WRI36]. Dabei stellt C_0 die Herstellkosten bei der Ausbringungsmenge M_0 und C_t die Herstellungskosten bei der Ausbringungsmenge M_t dar. b beschreibt den Steigungsparameter der Lernkurve.

$$C_t = C_0 * (\frac{M_t}{M_0})^{-b}$$
 Gl. 12-1

Je nach Industriebranche sowie Wertschöpfungstätigkeit können unterschiedlich hohe Steigungsparameter bidentifiziert werden, vgl. Abb. 12-31

Die durchschnittliche Erfahrungsrate in der Automobilindustrie beträgt 14 % [FOU06]. Dieser Durchschnittswert ist ein Mittelwert über allen Gesamtfahrzeugproduktionen, von Volumenbis Premiumsegment. Je nach Fahrzeughersteller und Produktportfolioausprägung kann dieser Wert signifikant höher bzw. niedriger liegen.

Branche/Sektor	Erfahrungsrate	Wertschöpfungsprozess	Erfahrungsrate
Maschinenbau	10-20%	Montage	13%
Elektrotechnik	20-40%	Presswerk	6%
Luftfahrt	15%	Karosseriebau	9%
Unterhaltungselektronik	28%	Lackiererei	4%
Haushaltsgeräte	20%	Vormontage Elektronik	15%

Abb. 12-31: Exemplarische Erfahrungsraten differenziert nach Branche und Wertschöpfungsprozessen [FOU06] [BEC08] [LÖF11]

Die Untersuchung von [WEI12] fokussiert den Anteil der generierten Erfahrungsraten bei der Produktion des Hybridfahrzeugs Toyota Prius der an die Endkunden im Marktlistenpreis weitergegeben wird. Hierzu wurden die Endkundenlistenpreise des Prius in Japan, Deutschland und den USA über der Zeit bzw. Produktionsmenge verfolgt und graphisch visualisiert, vgl. Abb. 12-32. Dabei wurden die Marktpreise auf das Jahr 2010 inflationsbereinigt und auf die Antriebsleistung normiert.

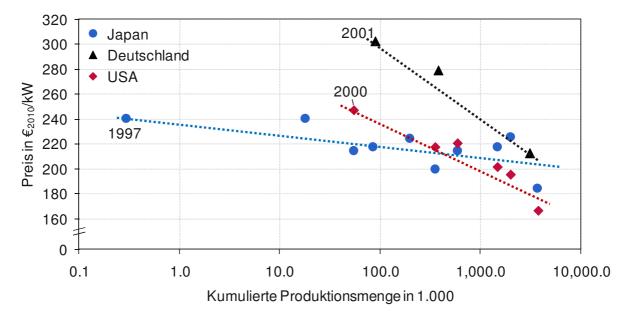


Abb. 12-32: Erfahrungskurven in der Preisentwicklung beim Toyota Prius in verschiedenen Ländern [WEI12]

Im Wesentlichen sind für alle drei Märkte sinkende Marktpreise über der Zeit bzw. kumulierten Produktionsmenge zu beobachten. In Abhängigkeit der Markteinführungsstrategie des Herstellers für ein hoch innovatives Produkt und der üblichen Marktpreise für Neufahrzeuge entwickelte sich der Preis mit der Zeit. Während in Japan die Markteinführung des Toyota bereits 1997 mit einem Preis von 240 €/kW startete, folgte in 2000 der US Amerikanische und 2001 der deutsche Markt mit einem Preis von 250 €/kW bzw. 300 €/kW. In der Entwick-

lung des Endkundenpreises ist die Erfahrungsrate über der hier aufgebrachten logarithmischen Skala gut erkennbar als negative Geradensteigung.

Da das Fahrzeug im japanischen Markt, bei Beachtung der Markteinführungspreise von Deutschland und den USA, unter Herstellungskosten eingeführt worden sein könnte, ist hier eine vergleichsweise niedrige Erfahrungsrate von ca. 1 % zu sehen, die an den Endkunden weitergegeben wird. In Deutschland und den USA wurde eine Erfahrungsrate von ca. 6 % an die Endkunden weitergegeben.

Innerhalb der vorliegenden Studie wurden alle Herstellungskosten der Technologien für das Massenproduktionslevel und das Jahr 2020 angenommen, so dass keine zusätzlichen Erfahrungsraten kalkulativ zu berücksichtigen sind. Bei Übertragung der Ergebnisse für die Jahre 2025 und 2030 müssten je Technologie entsprechende Abschätzungen durchgeführt werden.

13 Anhang B: Sonstiges

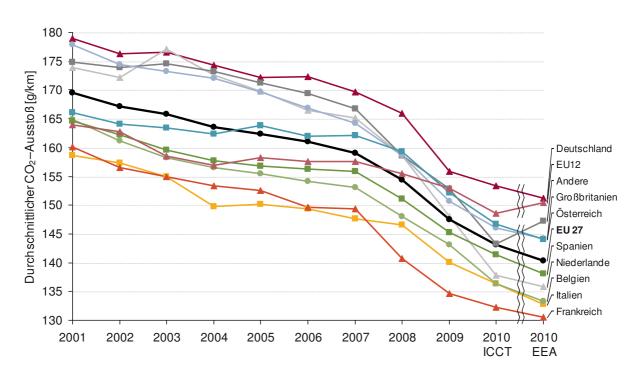


Abb. 13-1: Entwicklung der CO₂-Flottenemissionen bei den Neuzulassungen in Europa nach Ländern [Datenbasis: [EEA11][ICC11d]]

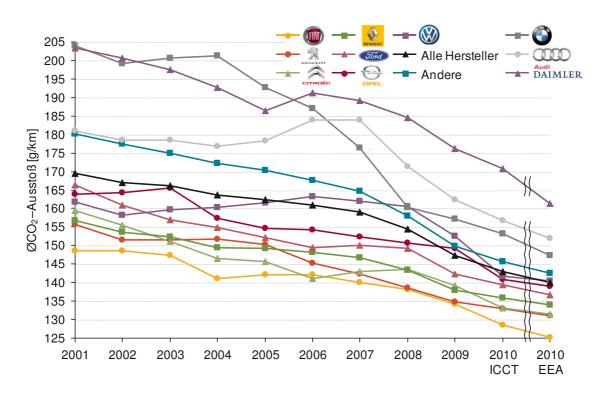


Abb. 13-2: Entwicklung der CO₂-Flottenemissionen bei den Neuzulassungen in Europa nach Herstellern [Datenbasis: [EEA11][ICC11d]]

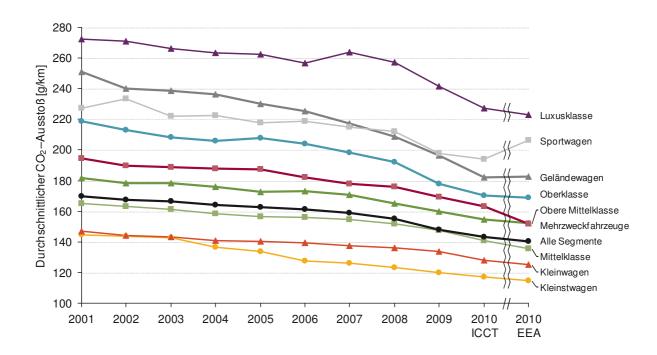


Abb. 13-3: Entwicklung der CO₂-Flottenemissionen bei den Neuzulassungen in Europa nach Fahrzeugsegmenten [Datenbasis: [EEA11][ICC11d]]

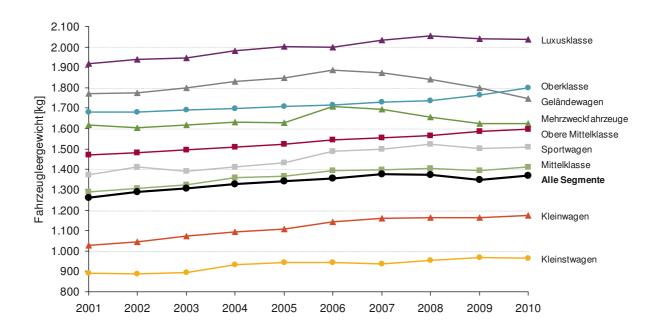


Abb. 13-4: Entwicklung des Leergewichts bei den Neuzulassungen in Europa nach Fahrzeugsegmenten [Datenbasis:[ICC11d]]

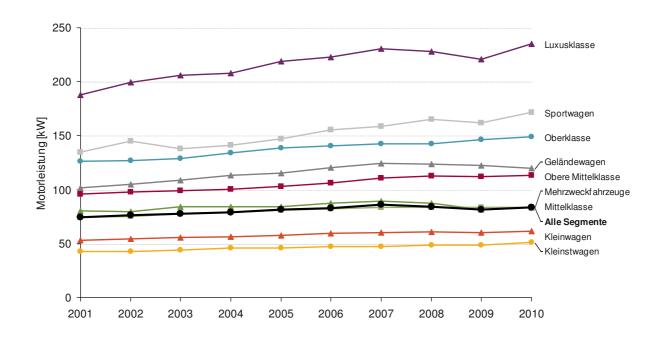


Abb. 13-5: Entwicklung der Motorleistung bei den Neuzulassungen in Europa nach Fahrzeugsegmenten [Datenbasis:[ICC11d]]

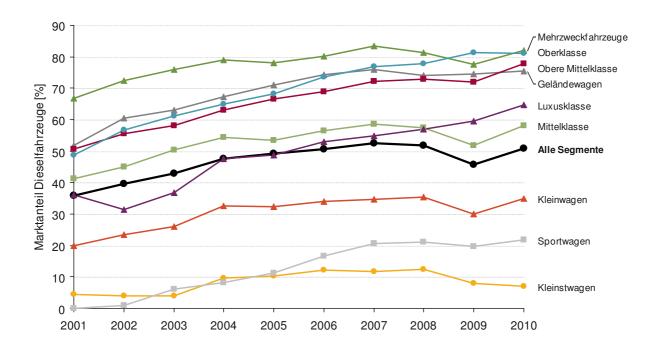


Abb. 13-6: Entwicklung des Dieselanteils bei den Neuzulassungen in Europa nach Fahrzeugsegmenten [Datenbasis:[ICC11d]]

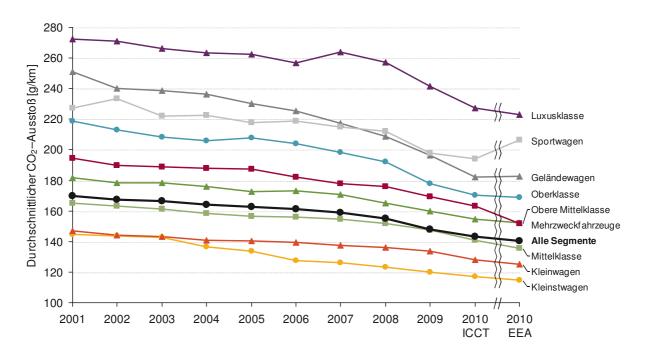


Abb. 13-7: Entwicklung der Hubraumgröße bei den Neuzulassungen in Europa nach Fahrzeugsegmenten [Datenbasis:[ICC11d]]

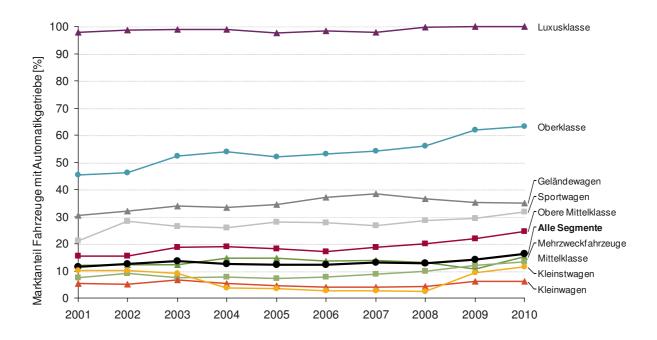


Abb. 13-8: Entwicklung der Automatikgetriebe bei den Neuzulassungen in Europa nach Fahrzeugsegmenten [Datenbasis:[ICC11d]]

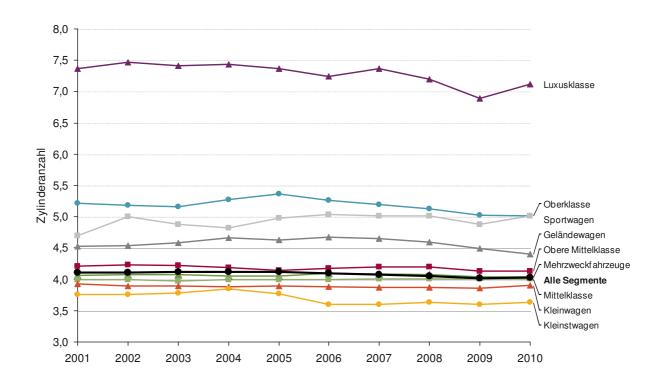


Abb. 13-9: Entwicklung der Zylinderzahl bei den Neuzulassungen in Europa nach Fahrzeugsegmenten [Datenbasis:[ICC11d]]

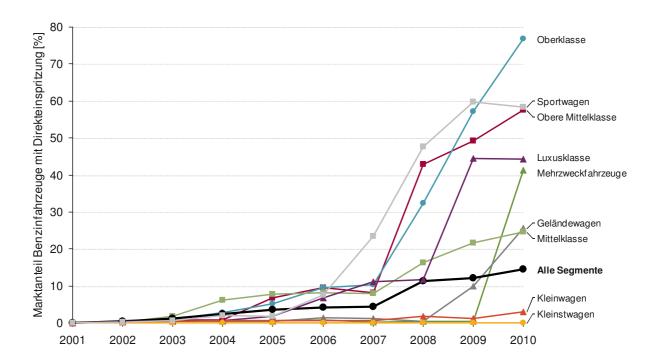


Abb. 13-10: Entwicklung der Benzin-Direkteinspritzung bei den Neuzulassungen in Europa nach Fahrzeugsegmenten [Datenbasis:[ICC11d]]

Abb. 13-11: Technologieportfolio SEG-1 – Benzin

Abb. 13-12: Technologieportfolio SEG-1 – Diesel

Abb. 13-13: Technologieportfolio SEG-2 - Benzin

Abb. 13-14: Technologieportfolio SEG-2 – Diesel

Abb. 13-15: Technologieportfolio SEG-3 - Benzin

Abb. 13-16: Technologieportfolio SEG-3 – Diesel



Interviewfragebogen

Studie im Auftrag für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi):

CO₂-Reduzierungspotenzial bei Pkw bis 2020

18.06.2012, Telefoninterview

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Christian-Simon Ernst

Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen University

#113510 · 12CE0117.pptx

Folie Nr. 1 18.06.2012

© ika 2012 · All rights reserved

Abb. 13-17: Interviewleitfaden Seite 1

CO₂-Reduzierungspotenzial bei Pkw bis 2020 Agenda



- Einleitung
- Technologiebewertung
- Marktprognose
- Offene Fragen

F113510 · 12CE0117,pptx Folie Nr. 2 18.06.2012 © ika 2012 · All rights reserv

Abb. 13-18: Interviewleitfaden Seite 2

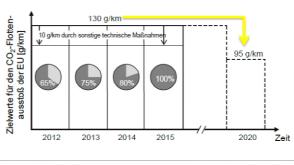
Einleitung

Ausgangslage



Interviewinhalt

- Das Institut für Kraftfahrzeuge führt im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) eine Studie zum CO₂-Reduzierungspotenzial bei Pkw bis 2020 durch.
- Hintergrund ist eine Untersuchung der Konsequenzen der EU Verordnung 443/2009, in welcher spezifische Flotten CO₂-Ziele festgelegt werden.
- Für die Übergangsphase zwischen 2012 und 2015 wurde ein "Phase-In" zu dem Flottengrenzwert von 130 g/km vorgesehen. Somit muss zunächst nur ein Teil der Pkw-Flotten die Zielvorgaben erfüllen.
- Für das Jahr 2020 ist der Flottenzielwert von 95 g/km definiert.



#113510 - 12CE0117.pptx

Folie Nr. 3 18.06.2012

© ika 2012- All rights reserved

Abb. 13-19: Interviewleitfaden Seite 3

Einleitung

Interviewmethodik



Interviewinhalt

- Zielsetzung Interview:
 - Abgleich der bisherigen Analyseergebnisse mit einer OEM spezifischen Bewertung hinsichtlich der einzelnen technischen Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Flottenemissionen.
 - Überprüfung der gebildeten Technologiepakete (z.B. TP1, TP2K, TP2H) und dem daraus aggregierten CO₂-Einsparpotenzial.
 - Einschätzungen zur Marktentwicklung hinsichtlich der zukünftigen Fahrzeugsegment- und Kraftstoffverteilung.
- Ergebnisaufbereitung und –übermittlung:
 - Interne Auswertung der Interviews
 - Übermittlung der Interviewergebnisse an die Interviewpartner in anonymisierter Form.

#113510 · 12CE0117.pptx

Folie Nr. 4 18.06.2012

© ika 2012- All rights reserved

Abb. 13-20: Interviewleitfaden Seite 4

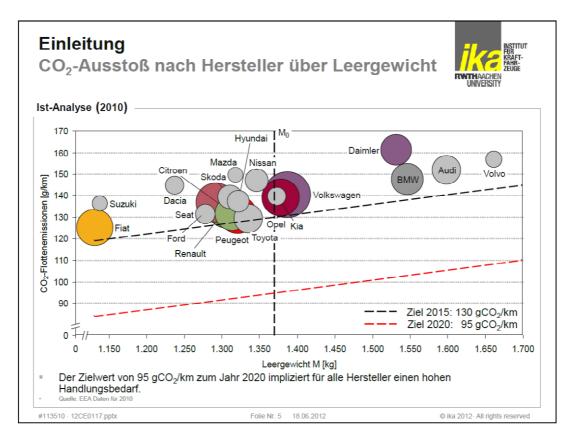


Abb. 13-21: Interviewleitfaden Seite 5

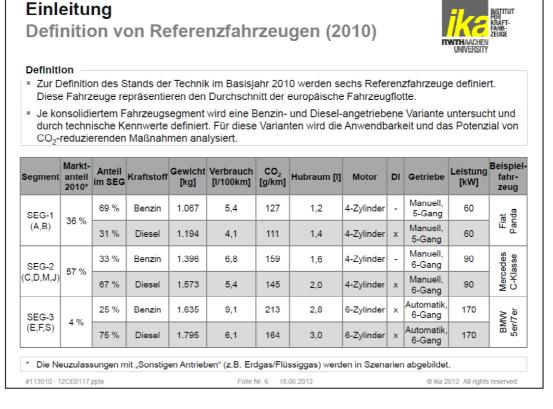


Abb. 13-22: Interviewleitfaden Seite 6



Abb. 13-23: Interviewleitfaden Seite 7

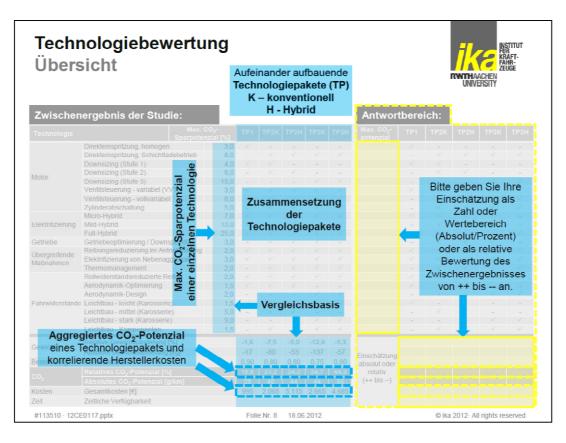


Abb. 13-24: Interviewleitfaden Seite 8

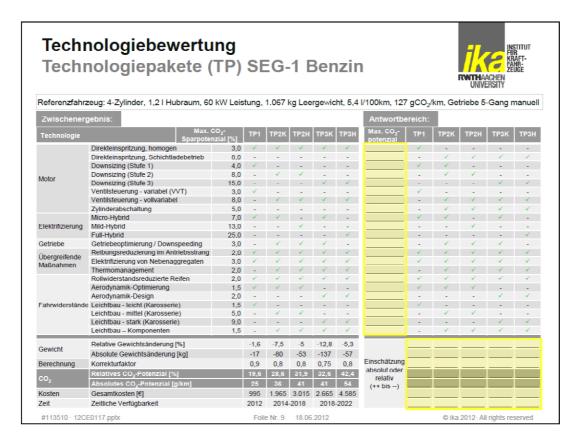


Abb. 13-25: Interviewleitfaden Seite 9

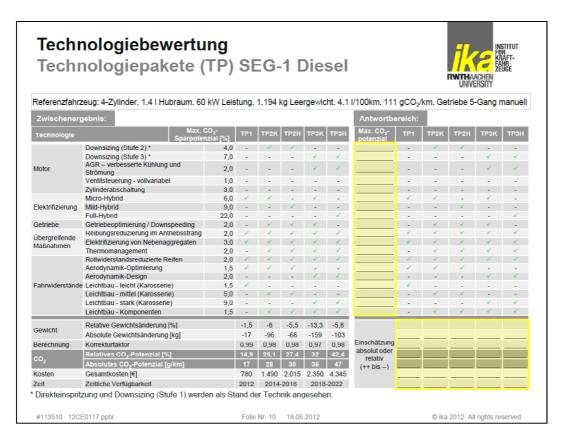


Abb. 13-26: Interviewleitfaden Seite 10

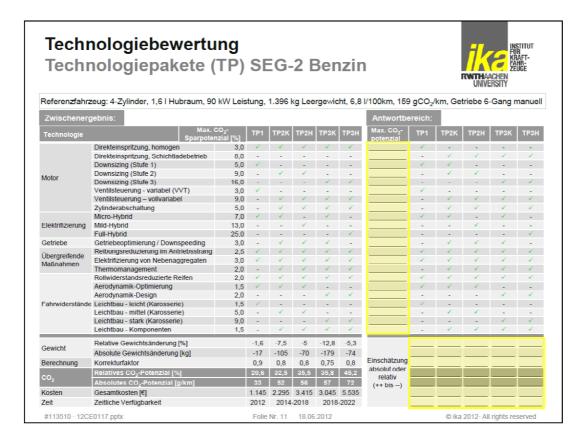


Abb. 13-27: Interviewleitfaden Seite 11

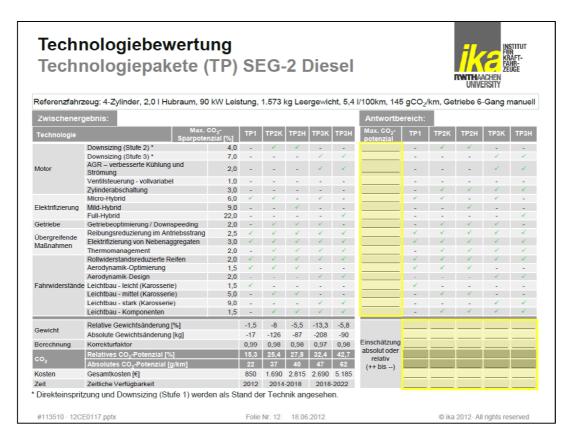


Abb. 13-28: Interviewleitfaden Seite 12

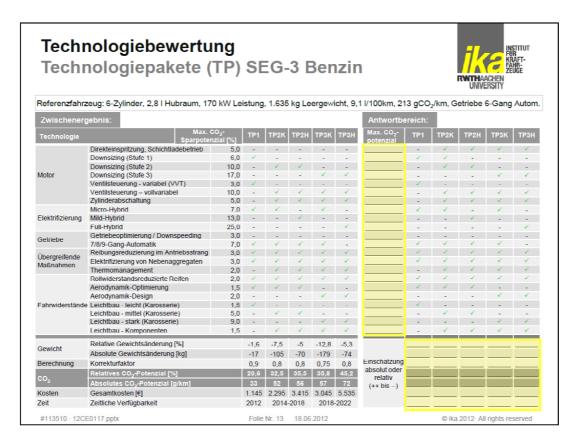


Abb. 13-29: Interviewleitfaden Seite 13

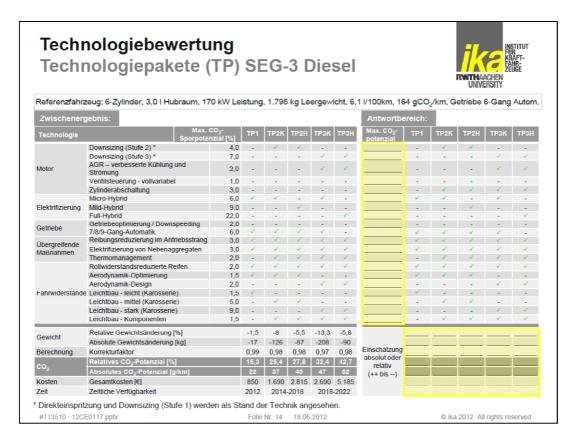


Abb. 13-30: Interviewleitfaden Seite 14

© ika 2012 All rights reserved

CO₂-Reduzierungspotenzial bei Pkw bis 2020 Agenda Einleitung Technologiebewertung Marktprognose Offene Fragen

Folie Nr. 15 18.06.2012

Abb. 13-31: Interviewleitfaden Seite 15

#113510 · 12CE0117.pptx

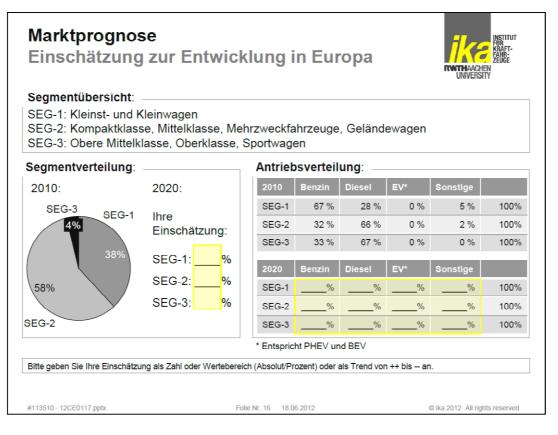


Abb. 13-32: Interviewleitfaden Seite 16

CO₂-Reduzierungspotenzial bei Pkw bis 2020 Agenda



- Einleitung
- Technologiebewertung
- Marktprognose

Offene Fragen

#113510 · 12CE0117.pptx

Folie Nr. 17 18.06.2012

© ika 2012 · All rights reserved

Abb. 13-33: Interviewleitfaden Seite 17

Offene Fragen: Welche Rolle werden Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang (PHEV und BEV) für Ihr Unternehmen bis 2020 spielen? Wie wichtig werden Ökoinnovationen für Ihr Unternehmen? Welchen Ökoinnovationen weisen Sie derzeit den größten Nutzen zu? Welche technologischen Hürden sehen Sie in der Erfüllung der spezifischen Zielwerte? Wie bewerten Sie die zeitliche Zielsetzung der EU-Verordnung vor dem Hintergrund Ihrer Zyklus-/ und Modellpläne?

Abb. 13-34: Interviewleitfaden Seite 18

© ika 2012- All rights reserved

© ika 2012- All rights reserved

Offene Fragen: Die Grenzwertgeraden ist über Achsabschnitt und Achssteigung definiert. Welche Veränderungen sind Ihrer Ansicht nach zielführend? (Verschiebung, Drehung) Ist eine Anpassung der Gesetzgebung auf den Parameter Footprint aus Ihrer Sicht wünschenswert? Welche Bedeutung messen Sie zukünftigen Flexibilisierungsmaßnahmen der EU-Verordnung, im Vergleich zu technologischen Maßnahmen. zu? (z.B. Super Credits, E85-Bonus, Crediting)

Folie Nr. 19 18.06.2012

Abb. 13-35: Interviewleitfaden Seite 19

Kontakt

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing Christian-Simon Ernst Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen University Steinbachstraße 7 52074 Aachen Germany Telefon +49 241 80 25664

Fax +49 241 80 22147

E-Mail ernst@ika.rwth-aachen.de Internet www.ika.rwth-aachen.de

#113510 · 12CE0117.pptx Folie Nr. 20 18.06.2012

Abb. 13-36: Interviewleitfaden Seite 20

Jahr	EUØ Superbenzinpreis		EU Ø Dieselkraftstoff- preis		WEO – "Current Policies Scenario"		WEO – "New Policies Scenario"		WEO – "450 Scenario"	
	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
2005	1,19€		1,02€							
2006	1,26€	5,96%	1,08€	5,73%						
2007	1,29€	2,73%	1,10€	1,84%						
2008	1,36€	5,20%	1,26€	14,57%						
2009	1,19€	-12,16%	1,06€	-16,36%						
2010	1,35€	13,56%	1,20€	13,28%						
2011	1,52€	11,91%	1,40€	16,64%	107,60		107,60		107,60	
2012	1,64€	8,11%	1,44€	3,44%	113,13	5,13%	112,45	4,51%	112,28	4,34%
2013	1,72€	4,75%	1,54€	6,61%	118,65	4,88%	117,3	4,31%	116,95	4,16%
2014	1,80€	4,76%	1,65€	7,25%	124,18	4,66%	122,15	4,13%	121,63	4,00%
2015	1,88€	4,76%	1,74€	5,24%	129,70	4,45%	127,00	3,97%	126,30	3,84%
2016	1,97€	4,76%	1,83€	5,25%	135,24	4,27%	130,94	3,10%	128,84	2,01%
2017	2,07€	4,77%	1,93€	5,26%	140,78	4,10%	134,88	3,01%	131,38	1,97%
2018	2,17€	4,77%	2,03€	5,26%	146,32	3,94%	138,82	2,92%	133,92	1,93%
2019	2,27€	4,78%	2,13€	5,27%	151,86	3,79%	142,76	2,84%	136,46	1,90%
2020	2,38 €	4,78%	2,25€	5,28%	157,40	3,65%	146,70	2,76%	139,00	1,86%
2021	2,49€	4,79%	2,37€	5,29%	163,24	3,71%	150,88	2,85%	141,2	1,58%
2022	2,61 €	4,79%	2,49€	5,29%	169,08	3,58%	155,06	2,77%	143,4	1,56%
2023	2,74€	4,80%	2,62€	5,30%	174,92	3,45%	159,24	2,70%	145,6	1,53%
2024	2,87€	4,80%	2,76€	5,31%	180,76	3,34%	163,42	2,62%	147,8	1,51%
2025	3,01 €	4,81%	2,91 €	5,31%	186,60	3,23%	167,60	2,56%	150,00	1,49%
2026	3,15€	4,81%	3,06€	5,32%	192,76	3,30%	172,16	2,72%	152,24	1,49%
2027	3,30€	4,81%	3,23€	5,33%	198,92	3,20%	176,72	2,65%	154,48	1,47%
2028	3,46€	4,82%	3,40€	5,34%	205,08	3,10%	181,28	2,58%	156,72	1,45%
2029	3,63€	4,82%	3,58€	5,34%	211,24	3,00%	185,84	2,52%	158,96	1,43%
2030	3,80€	4,83%	3,77 €	5,35%	217,40	2,92%	190,40	2,45%	161,20	1,41%

Abb. 13-37: Detaillierte Kraftstoffpreisprognose