

CO₂-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020

Abschlussbericht 123320

Dienstleistungsprojekt 59/12

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Institut für Kraftfahrzeuge
Strategie und Beratung

Abschlussbericht
CO₂-Emissionsreduktion
bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020

Projektnummer

123320

Auftraggeber:

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

Projektleiter:

Projektingenieur:

Christian Harter M. Sc.

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

Dipl.-Kfm. Ingo Olschewski
Geschäftsbereichsleiter Strategie und Beratung

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

Aachen, August 2014

Inhalt

1	Einleitung.....	7
2	Methodische Vorgehensweise Gesamtprojekt.....	8
3	Anknüpfung an die Studie CO ₂ -Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020.....	10
4	Umfeldanalyse.....	13
4.1	CO ₂ -Regulierung von neuen leichten Kraftfahrzeugen.....	13
4.1.1	CO ₂ -Regulierung in der EU.....	13
4.1.1.1	CO ₂ -Flottenzielwerte in der EU.....	13
4.1.1.2	Messung der spezifischen CO ₂ -Emissionen (NEFZ).....	15
4.1.1.3	Modalitäten für die Zielerreichung.....	17
4.1.1.4	Entwicklung der CO ₂ -Flottenemissionen.....	19
4.1.1.5	Diskussionsstand zur CO ₂ -Regulierung post 2020.....	19
4.1.2	Internationaler Vergleich der CO ₂ -Regulierung.....	21
4.1.3	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Testing Procedure (WLTP).....	25
4.1.3.1	Testzyklus (WLTC).....	26
4.1.3.2	Testprozedur (WLTP).....	27
4.1.3.3	Wirksamkeitsanalyse technologischer Maßnahmen im WLTC.....	28
4.2	Analyse der Märkte für leichte Kraftfahrzeuge in der EU und in DE.....	30
4.2.1	Zusammensetzung und Entwicklung des Pkw-Marktes in der EU.....	30
4.2.2	Zusammensetzung und Entwicklung des LNF-Marktes in der EU.....	35
4.3	Zwischenfazit.....	39
5	Technologische CO ₂ -Minderungspotenziale bis 2025 und 2030.....	40
5.1	Szenariendefinition.....	40
5.1.1	Entwicklung der Fahrzeugsegmente.....	41
5.1.2	Entwicklung der Antriebsarten.....	42
5.1.3	Entwicklungs- und Produktionszyklen auf Fahrzeug- und Technologieebene.....	44
5.1.3.1	Entwicklungsprozesse.....	44
5.1.3.2	Produktionszyklen und Plattformstrategien.....	46
5.2	Technologien zur Reduzierung der CO ₂ -Emissionen.....	49

5.2.1	Referenzfahrzeuge.....	49
5.2.2	Technologieroadmap.....	50
5.3	Technologiepaketbildung.....	53
5.4	Technologisch erreichbare CO ₂ -Flottenemissionen	57
5.4.1	Technologisch erreichbare Flottenemissionen bei Pkw	57
5.4.2	Technologisch erreichbare Flottenemissionen bei LNF	59
5.5	Zwischenfazit.....	60
6	Wirtschaftliche CO ₂ -Minderungspotenziale bis 2025 und 2030	63
6.1	Methodische Vorgehensweise	63
6.2	Eingangsparameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	64
6.2.1	Zusammensetzung der Endkundenlistenpreise	64
6.2.2	Energiepreisentwicklung	65
6.3	Kundengruppen und Kundenverhalten.....	66
6.3.1	Modellierung der Kundengruppen	66
6.3.2	Modellierung des Kundenverhaltens	68
6.4	Definition abstrahierter Fahrzeughersteller	69
6.5	Wirtschaftliche CO ₂ -Flottenemissionen	71
6.5.1	Ergebnisse für Pkw – Segmente	71
6.5.2	Ergebnisse für Pkw – Abstrahierte Fahrzeughersteller	76
6.5.3	Ergebnisse für LNF – Gruppen.....	78
6.5.4	Ergebnisse für LNF – Abstrahierte Fahrzeughersteller	80
6.5.5	Sensitivitätsanalysen.....	82
6.5.5.1	Sensitivität auf Änderungen des Endkundenpreises der Technologien	82
6.5.5.2	Sensitivität auf Änderungen der PHEV/REEV-Dimensionierung.....	83
6.5.5.3	Sensitivität auf Änderungen des Amortisationszeitraums	84
6.6	Zielerreichungskosten für alternative CO ₂ -Grenzwertkurven.....	85
6.6.1	Definition der Zielerreichungskosten	85
6.6.2	Zielerreichungskosten für Pkw – Abstrahierte Fahrzeughersteller	86
6.6.3	Zielerreichungskosten für LNF – Abstrahierte Fahrzeughersteller	88
6.7	Zwischenfazit.....	90
7	Ansätze für eine Novellierung der CO ₂ -Gesetzgebung in der EU.....	94

7.1	Parametervariationen	94
7.1.1	Anforderungen	94
7.1.2	Diskussion alternativer Parameter.....	95
7.2	Flexibilisierung der Zielerreichung	97
7.2.1	Ökoinnovationen	97
7.2.2	Supercredit-Regelungen	99
7.2.3	Banking-Borrowing-Systeme	101
7.2.4	CO ₂ -Zertifikatehandel.....	103
7.2.4.1	Ausgestaltungsmöglichkeiten im Verkehrssektor	103
7.2.4.2	Offener CO ₂ -Zertifikatehandel	104
7.2.4.3	Geschlossener CO ₂ -Zertifikatehandel	106
7.2.5	Technologiespezifische Förderungen in der CO ₂ -Regulierung	107
7.3	Zusammenfassende Bewertung und Zwischenfazit	108
8	Handlungsempfehlungen für den europäischen Gesetzgeber.....	110
9	Zusammenfassung	113
10	Abkürzungsverzeichnis.....	117
11	Literatur	118
12	Anhang I: Technologiebasis und Szenarientwicklung bis 2030	129
12.1	Identifizierte Einzeltechnologien.....	129
12.1.1	Verbrennungsmotor	129
12.1.2	Elektrifizierung des Antriebstrangs.....	130
12.1.3	Getriebe.....	131
12.1.4	Übergreifende Maßnahmen	131
12.1.5	Reduktion der Fahrwiderstände	132
12.2	Zusammenstellung der Technologiepakete	133
12.3	Kostenkurven der Technologiepakete.....	146
12.4	Szenariendefinition	152
13	Anhang II: Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Testing Procedure	154
13.1	Testzyklus (WLTC)	154

13.2	Testprozedur (WLTP)	157
13.2.1	Prüfmasse einer CO ₂ -Fahrzeugfamilie (CO ₂ -Interpolationsmethode).....	157
13.2.2	Ermittlung der Fahrwiderstände und Einstellung der Schwungmasse.....	159
13.2.3	Einstellungen zur Ermittlung des Rollwiderstandes.....	160
13.2.4	Einstellungen zur Ermittlung des Luftwiderstandes.....	161
13.2.5	Gangwechselstrategie	161
13.3	Anwendung der WLTP auf Hybridfahrzeuge.....	162
13.4	Zusammenfassung WLTP	165

1 Einleitung

Die Europäische Union strebt das Ziel an, die anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen in der Gemeinschaft bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % im Vergleich zum Niveau des Jahres 1990 zu reduzieren. Hierzu soll auch der Verkehrssektor beitragen. Gemäß dem „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050“ [EUR11a] und dem Weißbuch zur Verkehrspolitik [EUR11b] der Europäischen Kommission soll der Verkehrssektor seine Treibhausgasemissionen bis 2050 um mindestens 60 % reduzieren. Die CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs sind für ca. 22,4 % der anthropogenen CO₂-Emissionen der EU28 verantwortlich [EEA14a].

Die Regulierung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen (Pkw) und leichter Nutzfahrzeuge (LNF, bzw. N1-Klasse) ist ein zentrales Instrument auf europäischer Ebene zur weiteren Senkung der Emissionen im Straßenverkehr. Nach der kürzlich novellierten Verordnung (EG) Nr. 443/2009 müssen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der europäischen Pkw-Neuwagenflotte bis zum Jahr 2015 auf 130 g CO₂/km und bis Ende des Jahres 2020 auf 95 g CO₂/km verringert werden. Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der neu zugelassenen leichten Nutzfahrzeuge (LNF) müssen bis zum Jahr 2020 auf 147 g CO₂/km gemindert werden, vgl. Verordnung (EG) 510/2011. Der Rat und das Europäische Parlament haben die Europäische Kommission beauftragt, die beiden Verordnungen bis Ende 2015 zu überprüfen und Vorschläge zur Änderung der Rechtsakte vorzulegen, einschließlich der möglichen Festlegung von realistischen und erreichbaren Flottenzielwerten für neue Pkw und für leichte Nfz für die Zeit nach 2020, vgl. [EUR14b] [EUR14c].

Das Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University (ika) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) beauftragt, die technologisch und wirtschaftlich realisierbaren CO₂-Minderungspotenziale bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen bis 2025 und 2030 abzuschätzen. Die in dieser Studie abgeleiteten CO₂-Flottenzielwerte und Grenzwertkurven stellen objektive Leitplanken für die Weiterentwicklung der CO₂-Regulierung nach 2020/2021 dar. Des Weiteren soll die Wirkung von Änderungen zentraler Parameter der europäischen CO₂-Flottenregulierung auf die deutschen und europäischen Fahrzeughersteller untersucht werden. Schließlich sollen mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Kosteneffizienz und der Wirtschaftlichkeit der Regulierung analysiert werden. Die in der vorliegenden Studie enthaltenen Untersuchungsergebnisse können in die demnächst beginnende Diskussion auf EU-Ebene über die Weiterentwicklung der CO₂-Regulierung bei Kraftfahrzeugen einfließen.

2 Methodische Vorgehensweise Gesamtprojekt

Ziel dieser Studie ist die Untersuchung der technisch machbaren und wirtschaftlich realisierbaren CO₂-Reduzierungspotenziale bei neuen Pkw und LNF in Europa in den Zeiträumen bis 2025 und 2030. Der vorliegende Abschlussbericht stellt eine Synthese der Projektergebnisse dar. Sie werden in der in Abb. 2-1 vorgestellten Strukturierung präsentiert.

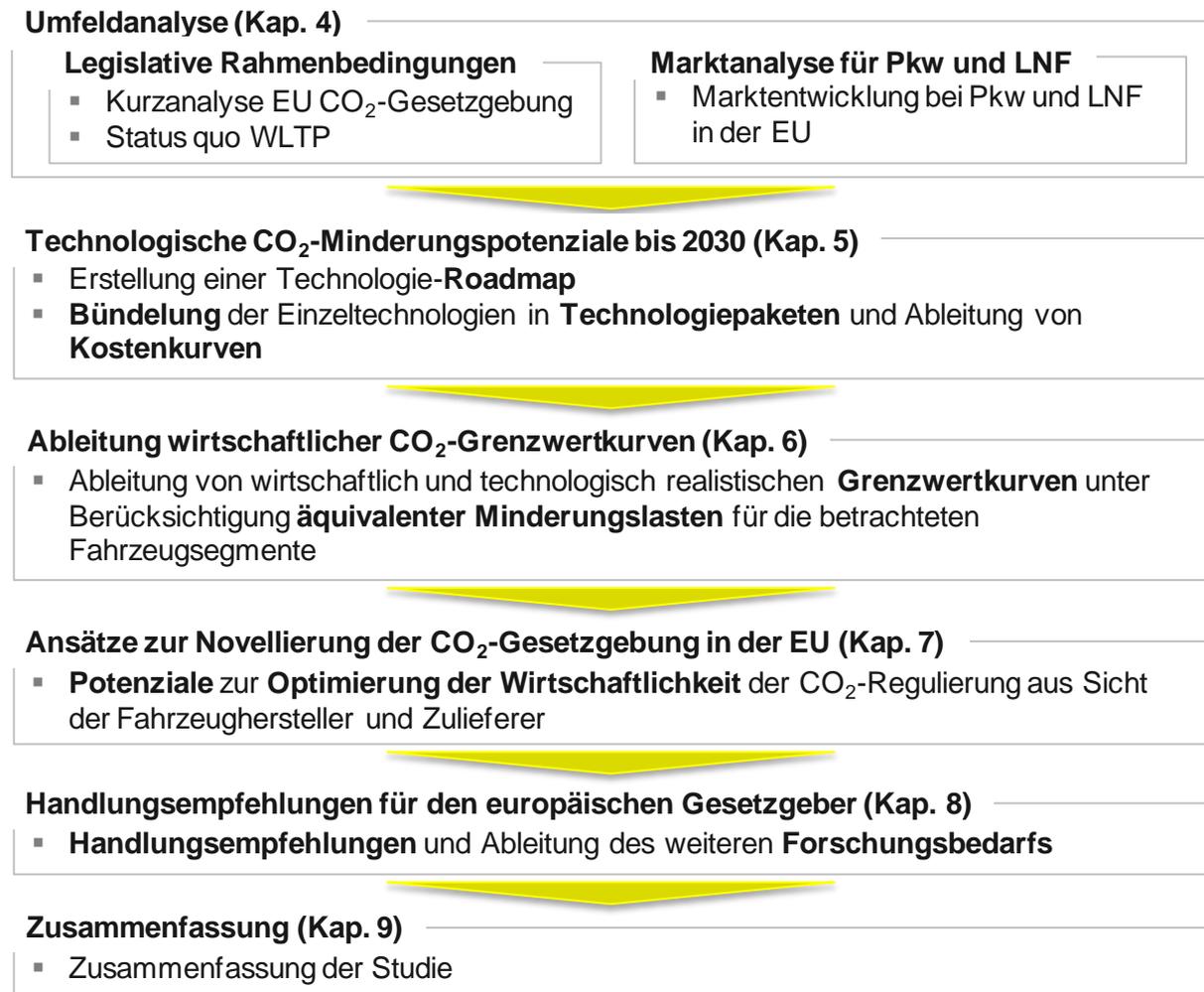


Abb. 2-1: Methodische Vorgehensweise des Gesamtprojekts

Aufbauend auf der thematischen Einführung (Kapitel 1), der methodischen Vorgehensweise (Kapitel 2) und den Kernergebnissen der Vorgängerstudie „CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020“ (Kapitel 3) wird in Kapitel 4 die europäische CO₂-Regulierung für leichte Kraftfahrzeuge inklusive verwendeter Messverfahren sowie begleitender Regelungen vorgestellt und einem Vergleich mit entsprechenden Regimen in anderen Ländern und Regionen unterzogen. Dabei wird auch auf die aktuelle Entwicklung der CO₂-Flottenemissionen und den derzeitigen Diskussionsstand betreffend die Weiterentwicklung der CO₂-Regulierung für die Zeit nach 2020 eingegangen. Da die neue WLTP-Prüfprozedur mittelfristig den derzeit verwendeten NEFZ ersetzen soll, wird in diesem Kapitel auch hierauf kurz eingegangen.

Ferner werden in Kapitel 4 zentrale Größen und Entwicklungen im europäischen Pkw- und LNF-Markt dargestellt, um auf dieser Basis in Kapitel 5 die technologisch machbaren CO₂-Minderungspotenziale bei Pkw und LNF im Betrachtungszeitraum bis 2030 abzuschätzen. Hierzu wird in allen relevanten Fahrzeugdomänen ein Technologiescreening durchgeführt, wobei alle identifizierten Technologien sowohl hinsichtlich ihres CO₂-Minderungspotenzials als auch ihrer Herstellkosten auf Systemebene quantifiziert werden. Die Einzeltechnologien werden schließlich mehrstufig zu sogenannten Technologiepaketen zusammengefasst und zur Abschätzung der technologisch theoretisch minimal erreichbaren CO₂-Flottenemissionen auf EU-Ebene verwendet.

In Kapitel 6 werden auf Basis der definierten Technologiepakete und der damit verbundenen Fahrzeugmehrkosten wirtschaftlich realisierbare CO₂-Grenzwertkurven für Pkw und LNF im Untersuchungszeitraum abgeleitet. Hierzu wird untersucht, welche Technologiepakete für die privaten und gewerblichen Kundengruppen in den verschiedenen Fahrzeugsegmenten bei auf Grundlage einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung akzeptabel sind. Wesentliche Eingangsparameter der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen stellen dabei das Entscheidungsverhalten der Kunden und die künftige Energiepreisentwicklung dar. Diese werden deshalb szenario-basiert modelliert. Als Ergebnis kann abgeleitet werden, welche CO₂-Flottenemissionen sich bei Pkw und LNF unter den gegebenen Rahmenbedingungen rein auf Basis wirtschaftlicher Investitionsentscheidungen der Endkunden einstellen könnten. Darauf aufbauend kann für einzelne Fahrzeugsegmente und definierte Fahrzeughersteller dargelegt werden, in welchem Umfang die Erreichung darüber hinausgehender, ambitionierterer Flottenzielwerte mit Mehrkosten verbunden wäre, die durch Kraftstoffeinsparungen über die angenommene Haltedauer der Fahrzeuge nicht amortisiert werden können.

In Kapitel 7 wird anschließend analysiert, inwiefern im Zuge einer Novellierung der europäischen CO₂-Gesetzgebung, auch im Hinblick von aus internationalen Märkten abgeleiteten Flexibilisierungsmaßnahmen, die Kosteneffizienz und die Wirtschaftlichkeit der CO₂-Regulierung verbessert werden kann. Hierbei wird ein besonderer Fokus auf deutsche Automobilhersteller gelegt. Betrachtet werden in diesem Kontext u.a. die Effekte von Banking-Borrowing-Systemen oder von unterschiedlichen Implementierungsmöglichkeiten eines CO₂-Zertifikatehandels im europäischen Verkehrssektor.

In Kapitel 8 können schließlich auf Basis der durchgeführten Analysen unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Aspekte Handlungsempfehlungen zur zukünftigen Ausgestaltung der CO₂-Gesetzgebung abgeleitet werden. Der Bericht schließt mit einer Zusammenfassung der Kernergebnisse in Kapitel 9.

3 Anknüpfung an die Studie CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020

Die vorliegende Studie nimmt direkten Bezug auf vorangegangene Untersuchungen des Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University und der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka). Zum einen wurde im Auftrag des BMWi die Studie „CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020“ angefertigt [ERN12], zum anderen Kurzstudien bezüglich des CO₂-Reduzierungspotenzials bei leichten Nutzfahrzeugen bis 2020 [ERN10] [ERN13]. Beide Studien haben zum Gegenstand, technologisch mögliche und wirtschaftlich vertretbare CO₂-Minderungspotenziale für Pkw bzw. LNF zu evaluieren, betrachten dabei jedoch lediglich den Zeitraum bis 2020.

Aus der Pkw-Studie ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die legislativ geforderten CO₂-Zielwerte bis 2020 zwar technologisch theoretisch zu erreichen sind, eine entsprechende Senkung der CO₂-Flottenemissionen für die Fahrzeugendkunden jedoch in vielen Fällen nicht wirtschaftlich ist. Im Trendszenario, in welchem von einer moderaten Steigerung der Kraftstoffpreise sowie des Anteils alternativer Antriebe ausgegangen wird, stellen sich im Jahr 2020 bei einer reinen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Endkunden CO₂-Flottenemissionen in Höhe von 103 g CO₂/km bis 108 g CO₂/km ein. Dabei wurde angenommen, dass alle Hersteller insbesondere die Technologien mit der besten Kosten-Nutzen-Verhältnis in den Markt einführen und bei der Bestimmung des Endkundenlistenpreises einen Aufschlag von 40 % bis 80 % (Δ Herstellkosten „ Δ HK“: Mehrwertsteuer, Vertriebskosten, Marge) auf die reinen Herstellkosten berücksichtigen. In diesem Szenario sind die Endkunden bereit, durchschnittlich 1.900 € (Endkundenlistenpreis) in zusätzliche Technologien zu investieren, welche sich über einem Betrachtungszeitraum von sechs Jahren amortisieren. Zur Erreichung der 95 g-Grenzwertgerade im Jahr 2020 entstünden den Fahrzeugherstellern im Trendszenario zwischen 650 und 950 € Mehrkosten (Herstellerkostenniveau) pro Fahrzeug, die sie nicht an den Endkunden weitergeben könnten [ERN12].

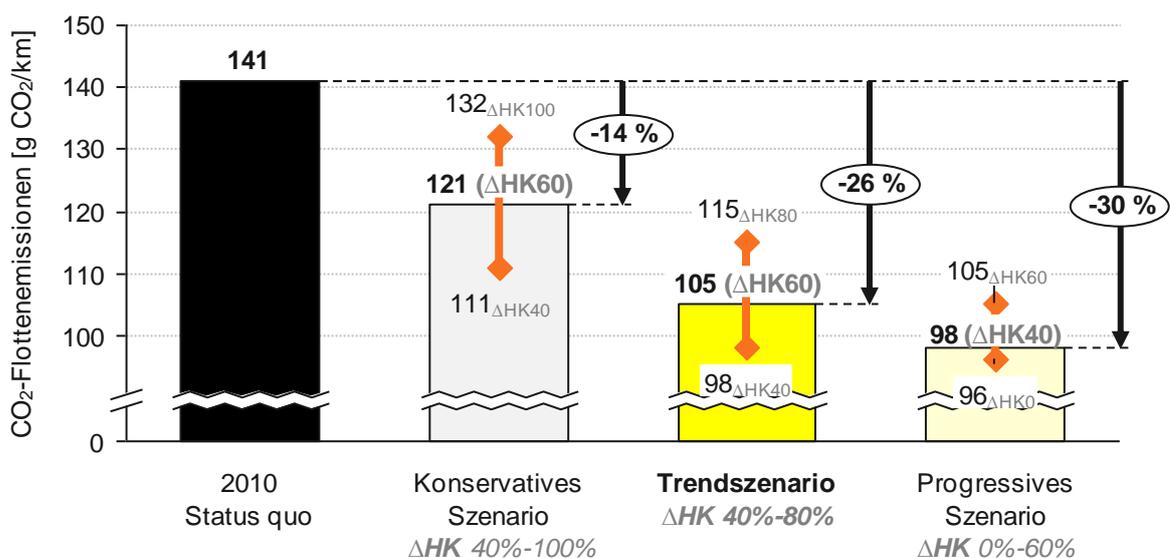


Abb. 3-1: Szenario-Ergebnisse: CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020 [ERN12]

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich im Rahmen der Studien zu leichten Nutzfahrzeugen. Auch hier erscheint die Minderung der CO₂-Emissionen auf den gesetzlichen Grenzwert technologisch möglich, jedoch im Durchschnitt aller Endkunden nicht wirtschaftlich [ERN13].

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden die Betrachtungen zu Pkw und LNF integriert, und für den neuen Zeithorizont bis zum Jahr 2030 entsprechend adaptiert. Die grundlegenden Annahmen der Vorgängerstudien werden beibehalten. Dies betrifft unter anderem:

- das Basisjahr der Analysen: 2010 für Pkw, 2011 für LNF und somit auch die technologische Ausgangsbasis mit der Definition der jeweiligen Referenzfahrzeuge.
- die Definition der Szenarien bis 2020, welche bis 2030 konsistent weiterentwickelt werden. Die Bezeichnung „realistisches Szenario“ wird zu „Trendszenario“ angepasst.
- die grundsätzliche methodische Vorgehensweise, gekennzeichnet durch die Kernelemente der Technologiepaketbildung und die Ableitung realistischer CO₂-Flottenemissionswerte durch Modellierung der Investitionsentscheidungen der einzelnen Kundengruppen.

Durch die Ausweitung des Analysehorizontes bis 2030 werden nun auch jene Technologien berücksichtigt, die erst im Zeitraum nach 2020 bedeutende Marktanteile erreichen und zur weiteren technologischen Reduktion der CO₂-Emissionen beitragen können. Ebenso ist es notwendig, die evolutionäre Weiterentwicklung bereits existierender Technologien im Zeitraum nach 2020 zu quantifizieren, sowie das entsprechende Potenzial zur Produktionskostendegression (Lern- und Skaleneffekte) zu berücksichtigen. Beide Faktoren werden hierzu in die definierten Szenarien integriert.

Da für die Betrachtungen bis zum Jahr 2020 eine geringe Elektrifizierung des Antriebsstrangs als Ergebnis einer Meta-Analyse erwartet wird, wurden die PHEV-Marktanteile, welche sich nicht alleine aus einem Wirtschaftlichkeitskalkül ergeben, modellexogen und szenarienbasiert bestimmt. Für den Zeitraum nach 2020 wird jedoch eine stärkere Elektrifizierung des Antriebsstrangs erwartet, so dass im Rahmen der vorliegenden Studie die Technologiepaketbildung zusätzlich zu den in der Vorgängerstudie eingeführten zwei Entwicklungssträngen (konventionell sowie Hybrid) um einen Plug-in-Hybrid-Technologiepfad erweitert wird. Der Marktanteil von Fahrzeugen mit rein batterieelektrischem Antrieb wird hingegen weiterhin modellexogen szenarienbasiert abgeschätzt, vgl. Kap. 5.1.1, da die Investitionsentscheidungen der Endkunden von vielfältigen, nur unter großen Unsicherheiten quantifizierbaren Einflussfaktoren, z.B. Vorbehalten gegenüber der begrenzten Fahrzeugreichweite, abhängen.

Projektionen bis zum Jahr 2030 sind allgemein hohen Unsicherheiten unterworfen. Dies betrifft insbesondere Entwicklungen, welche ohnehin von großer Volatilität geprägt sind, z.B. Energiepreiszeitreihen (Kraftstoff und Strom), die eine wesentliche Determinante der Investitionsentscheidungen der Fahrzeugendkunden darstellen. Die Investitionsentscheidungen wurden im Rahmen der Vorgängerstudie durch detaillierte Kapitalwertberechnungen (Total Cost of Ownership – TCO) unter Berücksichtigung kontinuierlicher Energiepreiszeitreihen

und eines Annuitätenfaktors modelliert. In der vorliegenden Studie wird die Methodik auf eine statische Amortisationsrechnung umgestellt, da keine kontinuierlichen Preiszeitreihen und Zinssatz-Annahmen benötigt werden und die statische Amortisationsrechnung im Kontext des sehr langen Prognosehorizonts mit den bereits genannten Unsicherheiten als ausreichend qualifiziert angesehen werden kann.

4 Umfeldanalyse

In einem ersten Schritt wird die historische Entwicklung der CO₂-Flottenemissionen neuer Pkw und LNF betrachtet. Anschließend wird die geltende CO₂-Regulierung für Pkw und LNF in der EU bis zum Jahr 2020/21 dargestellt und erläutert, nach welchen Messverfahren die für die Zielerreichung relevanten CO₂-Emissionen bei Neufahrzeugen ermittelt werden. Da Automobilhersteller in der Regel international operieren und CO₂-Gesetzgebungen in weiteren großen Automobilmärkten deshalb ebenso von Relevanz sind, werden anschließend die wesentlichen CO₂-Zielwerte und Regularien anderer bedeutender globaler Regionen herausgearbeitet.

Da die „Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Testing Procedure“ WLTP-Prüfprozedur als neuer Fahrzyklus mit darauf abgestimmter Testprozedur mittelfristig in der EU zur Anwendung kommen soll, werden im Rahmen dieses Kapitels die relevanten Unterschiede zwischen dem WLTP-Prüfverfahren und dem geltenden NEFZ-Prüfverfahren herausgearbeitet und die mit der WLTP-Einführung verbundenen Herausforderungen umrissen.

Anschließend wird die tatsächliche Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen den beschlossenen EU-Flottenzielwerten für Pkw und LNF gegenübergestellt. Ferner wird der aktuelle Stand der Diskussion in der EU um die Weiterentwicklung der CO₂-Regulierung für die Zeit nach 2020 dargestellt.

4.1 CO₂-Regulierung von neuen leichten Kraftfahrzeugen

Im Folgenden werden zunächst die legislativen Rahmenbedingungen in der EU dargestellt, anschließend werden die zentralen Punkte des aktuellen Diskussionsstandes der WLTP-Prüfprozedur präsentiert.

4.1.1 CO₂-Regulierung in der EU

Zunächst werden die aktuell gültigen CO₂-Flottenzielwerte für Pkw und LNF bis 2020/21 erläutert. Darauf aufbauend wird vorgestellt, wie die entsprechenden CO₂-Emissionen der unterschiedlichen Kraftstoff- und Antriebsarten berechnet werden. Die Modalitäten für die Zielerreichung werden ebenfalls dargestellt.

4.1.1.1 CO₂-Flottenzielwerte in der EU

Im Jahr 2009 trat die Verordnung (EG) Nr. 443/2009 zur Verminderung der CO₂-Emissionen von Pkw in Kraft, die Anfang 2014 novelliert wurde. In ihr ist ein durchschnittlicher spezifischer CO₂-Ausstoß von 130 g CO₂/km im Jahr 2015 als Zielvorgabe für die europäische Flotte der Pkw-Neuzulassungen festgelegt [EUR09]. Bis Ende 2020 wird der Zielwert um 35 g CO₂/km (-27 %) auf 95 g CO₂/km abgesenkt. Für jeden Hersteller gilt dabei ein individueller CO₂-Flottenzielwert, der von der durchschnittlichen Masse seiner Neufahrzeugflotte abhängig ist, vgl. Abb. 4-1. Im Jahr 2020 müssen jedoch nur die effizientesten 95 % einer Flotte den Zielwert einhalten (Phase-In). Während die Steigung der Grenzwertkurve, d.h. die Mas-

seabhängigkeit, für den 130 g-Zielwert im Jahr 2015 noch 0,0457 beträgt, sinkt sie auf 0,0333 zum Jahr 2020/2021. Bei 100 kg erhöhter Flottendurchschnittsmasse liegt die CO₂-Zielwertvorgabe somit um 3,33 g CO₂/km höher.

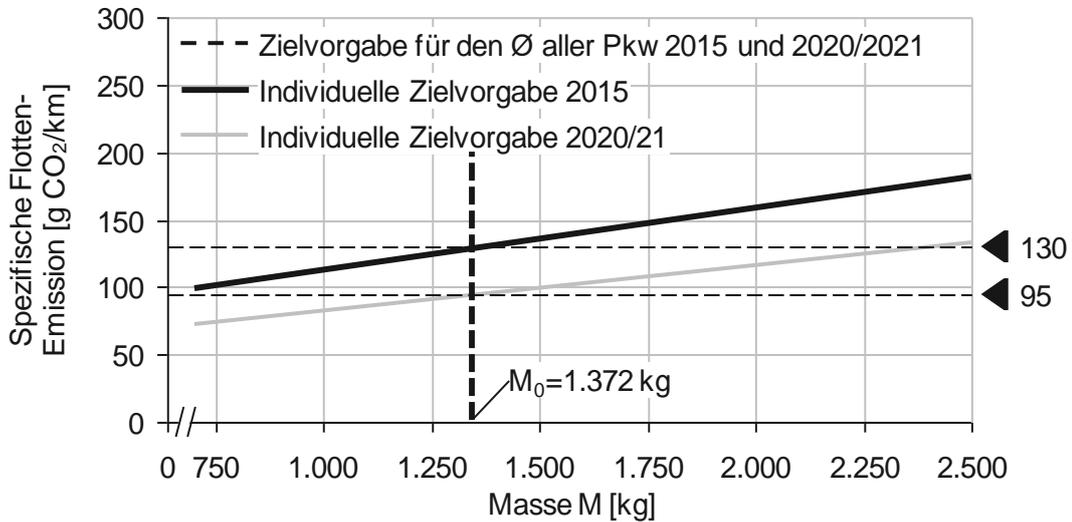


Abb. 4-1: Grenzwertkurve der CO₂-Emissionen der Pkw-Neuwagenflotte [EUR09]

Ende 2014 und anschließend alle weiteren drei Jahre wird die Bezugsmasse M₀ anhand der durchschnittlichen Masse aller Neufahrzeuge der vergangenen drei Jahre überprüft und für die Folgejahre angepasst. Die angegebene Bezugsmasse M₀ gilt somit vorerst für den Zeitraum 2012 bis 2015 [EUR09]. Veränderungen der durchschnittlichen Bezugsmasse der gesamten europäischen Neuwagenflotte können sich daher auf die herstellerspezifischen Zielwerte auswirken.

Im Jahr 2011 trat die EU-Verordnung Nr. 510/2011 in Kraft, die analoge Regelungen für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) vorsieht und Anfang 2014 novelliert wurde, vgl. Abb. 4-2.

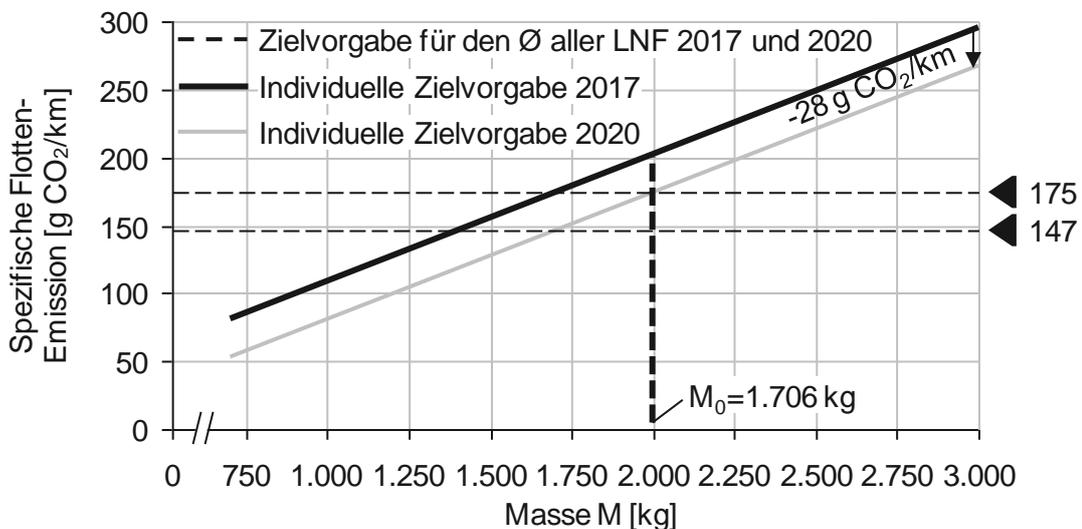


Abb. 4-2: Grenzwertkurve der CO₂-Emissionen der LNF-Neuwagenflotte [EUR11d]

Bei LNF darf der durchschnittliche spezifische CO₂-Ausstoß der europäischen Flotte der Neuzulassungen im Jahr 2017 die Zielvorgabe von 175 g CO₂/km nicht überschreiten. Bis zum Jahr 2020 wird der Zielwert um 28 g CO₂/km (16 %) auf 147 g CO₂/km abgesenkt. Für jeden Hersteller gilt dabei ein individueller CO₂-Flottenzielwert, der von der durchschnittlichen Masse seiner Neufahrzeugflotte abhängig ist.

Bei LNF ist die Grenzwertkurve durch eine Steigung von 0,093 steiler ausgeführt als bei Pkw. Auch hier wird die Referenzmasse, die derzeit mit 1.706 kg festgelegt ist, 2018 an die durchschnittliche Masse der neuzugelassenen LNF der vorangegangenen drei Jahre angepasst.

4.1.1.2 Messung der spezifischen CO₂-Emissionen (NEFZ)

Die Messung der CO₂-Emissionen bzw. des Kraftstoff- oder Stromverbrauchs bei der Typzulassung in Europa legt die Norm ECE-R101 fest [EUR12] [EUR07]. Zur Verbrauchs- und Emissionsmessung wird derzeit der „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ) genutzt. Der NEFZ besteht aus vier Stadtzyklen und einem außerstädtischen Zyklus, siehe Abb. 4-3. Er gilt gleichermaßen für Pkw und LNF.

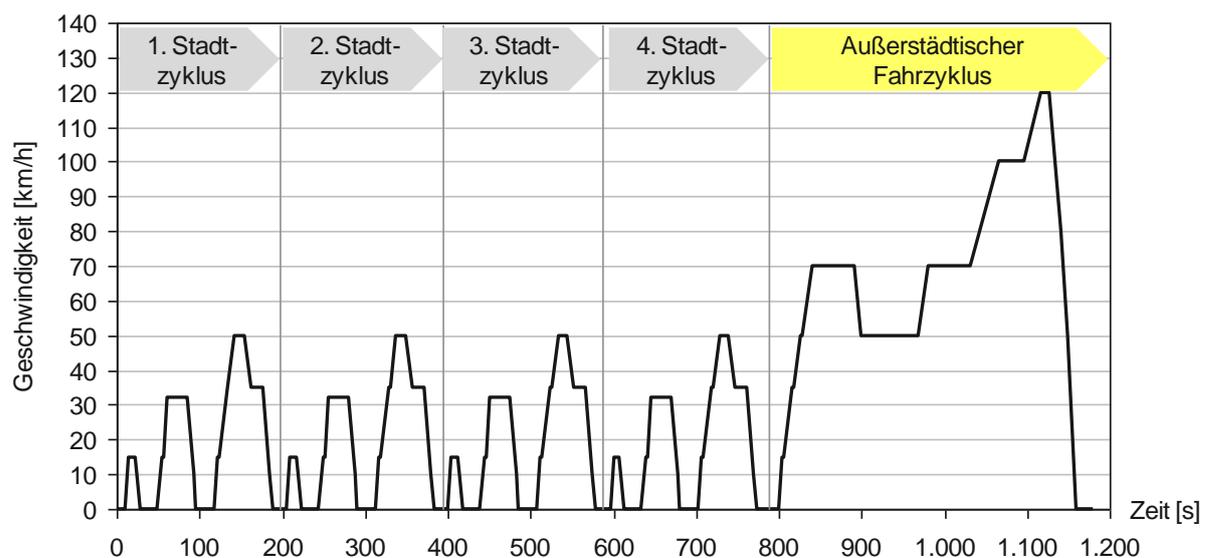


Abb. 4-3: Geschwindigkeitsprofil des neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) [TÜV05]

Auch Hybrid- und Elektrofahrzeuge durchfahren diesen Zyklus. Bei reinen Elektrofahrzeugen wird der Stromverbrauch in Wh/km gemessen. Sie gelten nach der derzeit gültigen Richtlinie als emissionsfrei [EUR07]. Eine Berücksichtigung der Emissionen zur Energieerzeugung (Vorkette) oder der Mehraufwände während der Produktion hätte den Effekt zur Folge, dass die technisch-wirtschaftliche Bewertung dieser Fahrzeuge im Rahmen der CO₂-Gesetzgebung deutlich verschlechtert würde.

Die Berechnung des Normverbrauchs respektive der CO₂-Emissionen von Plug-In-Fahrzeugen, die auch rein elektrisches Fahren ermöglichen, zeigt dagegen einige Besonderheiten.

ten. Das Messverfahren ist zweiteilig aufgebaut. Zunächst wird der NEFZ, gegebenenfalls mehrfach, mit anfangs vollständig geladener Batterie durchfahren und dabei im „Charge Depleting-Modus“ die rein elektrische Reichweite D_e ermittelt. Während dieser Strecke fährt das Fahrzeug nach ECE R101 emissionsfrei (Verbrauch im rein elektrischen Betrieb $C_1 = 0$ l/100 km). Anschließend durchfährt das Fahrzeug im „Charge Sustaining-Modus“, d.h. mit Batterie im minimalen Ladezustand, den NEFZ-Zyklus nur mit Hilfe des Verbrennungsmotors. Dabei wird der Normverbrauch C_2 in konventioneller Weise ermittelt. Anschließend werden beide Verbräuche miteinander kombiniert, wobei als Referenzfahrt die komplette Ausnutzung der rein elektrischen Reichweite D_e und eine anschließende verbrennungsmotorisch unterstützte Weiterfahrt von $D_{AV} = 25$ km angenommen wird. Die formale Berechnung wird in Gl. 4-1 dargestellt.

$$C = \frac{D_e \cdot C_1 + D_{AV} \cdot C_2}{D_e + D_{AV}} = \frac{D_{AV} \cdot C_2}{D_e + D_{AV}} \quad \text{Gl. 4-1}$$

- Mit
- C: kombinierter Verbrauch nach ECE R101
 - C_1 : Verbrauch im rein elektrischen Betrieb = 0 l/100 km
 - C_2 : Verbrauch mit Batterie im minimalen Ladezustand [l/100 km]
 - D_e : rein elektrische Reichweite [km]
 - D_{AV} : 25 km (angenommene Weiterfahrt mit Batterie im minimalen Ladezustand)

Diese Berechnungsmethodik impliziert, dass die rein elektrische Reichweite eines Plug-in-Fahrzeugs die CO_2 -Emissionen nach ECE R101 maßgeblich beeinflussen kann. Abb. 4-4 zeigt dies anhand von Berechnungsbeispielen.

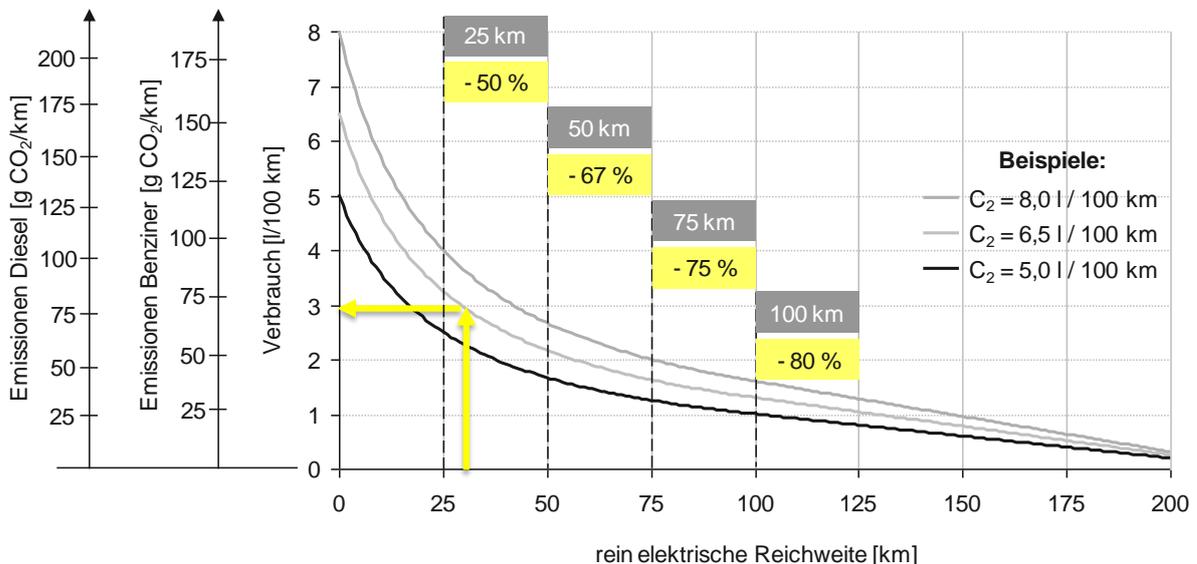


Abb. 4-4: Ermittlung des Verbrauches von PHEV nach ECE R101

Ein Fahrzeug mit einem Normverbrauch im Charge-Sustaining-Modus von 6,5 l/100 km wird nach ECE R101 bei einer rein elektrischen Reichweite von 30 km mit einem kombinierten Verbrauch von 2,95 l/100 km bewertet. Ausgehend vom rein verbrennungsmotorischen Ver-

brauch reduziert sich dieser bei einer rein elektrischen Reichweite von 25 km nach Gl. 3-1 um die Hälfte, bei einer elektrischen Reichweite von 75 km reduziert sich die kombinierte Verbrauchsangabe eines PHEV auf ein Viertel, vgl. Abb. 4-4.

Diese Berechnungsmethodik betont die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrens durch die Umlegung des rein verbrennungsmotorischen Verbrauchs auf die gesamte Fahrstrecke. Hingegen fließt die benötigte elektrische Energie nicht in die Emissionsbilanz des Fahrzeuges ein, da eine regenerative Erzeugung derselben unterstellt wird bzw. durch den Fahrzeughersteller nicht beeinflusst werden kann.

4.1.1.3 Modalitäten für die Zielerreichung

Die gegenwärtige europäische CO₂-Regulierung sieht verschiedene Modalitäten vor, welche die Zielerreichung für die Fahrzeughersteller erleichtern und/oder die Marktdurchdringung bestimmter emissionsmindernder Technologien fördern sollen.

Unter **Ökoinnovationen** werden allgemein Technologien verstanden, welche im realen Fahrbetrieb eine Senkung der CO₂-Flottenemissionen bewirken, deren Wirksamkeit prinzipbedingt jedoch nicht im standardisierten Testzyklus (derzeit NEFZ) erfasst werden kann. Diese Technologien können auf die Flottenemissionen der Fahrzeughersteller mit bis zu 7 g CO₂/km angerechnet werden. Ökoinnovationen müssen vorab genehmigt werden, um angerechnet werden zu können. Hierzu sind derzeit im Rahmen der geltenden CO₂-Regulierung die Folgenden Kriterien einzuhalten bzw. nachzuweisen [EUR11c]:

- Das CO₂-Reduktionspotenzial zeigt sich lediglich im realen Fahrbetrieb und wirkt sich nicht auf die CO₂-Emissionen nach NEFZ aus.
- Die innovativen Technologien dürfen nicht unter Vorschriften der in Artikel 1 der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 genannten vorgeschriebenen zusätzlichen Maßnahmen zur Erreichung der Verringerung um 10 g CO₂/km fallen oder nach anderen Bestimmungen des Unionsrechts vorgeschrieben sein.
- Die Installationsrate der Technologie darf maximal 3 % bei neu registrierten Pkw im Jahr 2009 betragen.
- Eine Notwendigkeit für den effizienten Betrieb des Fahrzeugs muss gegeben sein. Technologien mit Fokus auf Komfort werden daher ausgeschlossen.
- Unter Einsatz der Technologie ist im realen Fahrbetrieb mindestens eine Einsparung von 1 g CO₂/km möglich. Die gleichzeitige Anmeldung mehrerer Maßnahmen zur kumulativen Erreichung dieses Schwellenwertes ist nicht möglich.

Die Möglichkeit für Ökoinnovationen besteht für Pkw und LNF gleichermaßen. Bislang wurden vier Technologien von der zuständigen EU-Kommission als Ökoinnovationen zertifiziert und veröffentlicht vgl. Abb. 4-5. Im Jahr 2013 wurde jedoch nur das Fahrzeugmodell Audi A6 mit einer zertifizierten Ökoinnovation, den LED Scheinwerfern, im Rahmen des Monitoring der CO₂-Emissionen erfasst [EEA14]. Im Rahmen der möglichen Umstellung auf die WLTP-Prüfprozedur, vgl. Kapitel 4.1.3, sind die Ökoinnovationen hinsichtlich ihres CO₂-Reduktionspotenzials potenziell neu zu bewerten.

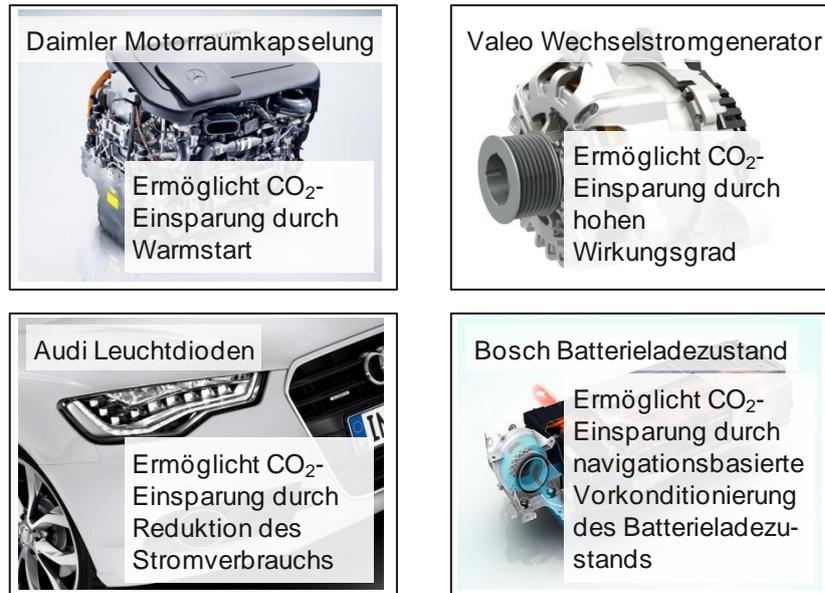


Abb. 4-5: Zertifizierte und veröffentlichte Ökoinnovationen [EUR13a] [EUR13b] [EUR13c] [EUR13d]

In der gegenwärtigen CO₂-Regulierung in der EU für Pkw und LNF sind **Supercredit-Regelungen** enthalten. Diese ermöglichen die mehrfache Anrechnung von besonders verbrauchsgünstigen Fahrzeugen, deren CO₂-Emissionen einen bestimmten Schwellenwert unterschreiten. Auch für den Zeitraum ab 2020 wird eine mehrfache Anrechnung CO₂-emissionsarmer Pkw unter 50 g CO₂/km möglich sein, vgl. Abb. 4-6. Der entsprechende Multiplikator soll schrittweise von 2,0 im Jahr 2020 auf 1,0 im Jahr 2023 abgesenkt werden. Insgesamt darf ein Hersteller über diesen Zeitraum verteilt seine CO₂-Flottenemissionen auf diese Weise um 7,5 g CO₂/km mindern [EUR13f]. Geltende Supercredit-Regelungen im Bereich der LNF laufen im Jahr 2018 aus und werden vorerst nicht erneuert [EUR14a]. Da der Grenzwert von 50 g CO₂/km masseunabhängig definiert ist, wird er neben BEV und FCEV insb. von kleineren und mittelgroßen PHEV erfüllt werden. PHEV-Fahrzeuge aus dem Luxus- oder Geländewagensegment werden diesen Schwellwert jedoch nur mit einem vergrößerten und somit teuren Batteriesystem erfüllen können.

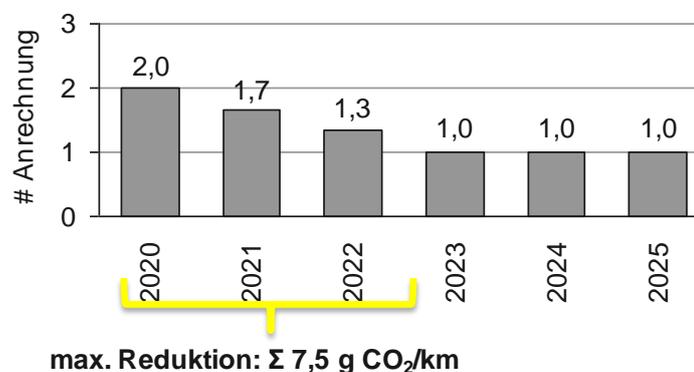


Abb. 4-6: Supercredit-Regelungen für Pkw in der EU ab 2020 [EUR13f]

4.1.1.4 Entwicklung der CO₂-Flottenemissionen

Die CO₂-Flottenemissionen neuer Pkw haben sich in den vergangenen über 10 Jahren bereits signifikant verbessert, vgl. Abb. 4-7. Ausgehend von einem Emissionsniveau von ca. 170 g CO₂/km im Jahr 2001 konnte im Jahr 2013 bereits ein Niveau von ca. 127 g CO₂/km (vorläufige EEA Daten) erzielt werden. Die CO₂-Flottenemissionen in Deutschland sowie der EU sanken in gleichem Maße jeweils um ca. 25 %. Dies entspricht einer jährlichen Verbesserungsrate von 3,6 g CO₂/km. Das Emissionslevel der deutschen Neuzulassungsflotte lag in den vergangenen Jahren stets über dem EU Niveau. Dies begründet sich maßgeblich durch eine andere Flottenzusammensetzung hinsichtlich der Fahrzeugsegmente, dem Kraftstoffmix sowie der überdurchschnittlich hohen Motorleistung und weiteren nachrangigen Effekten [ICC13a]

Die Zielsetzung des Jahres 2015 in Höhe von 130 g CO₂/km konnten somit bereits mehrere Herstellergruppen unterschreiten [EEA14]. Die weitere Zielsetzung bis Ende 2020 entspricht jedoch einer durchschnittlichen jährlichen Minderung von ca. 6,4 g CO₂/km (entspricht ca. 4,9 %) gegenüber 2015 und stellt somit eine hohe Herausforderung für die Branche dar.

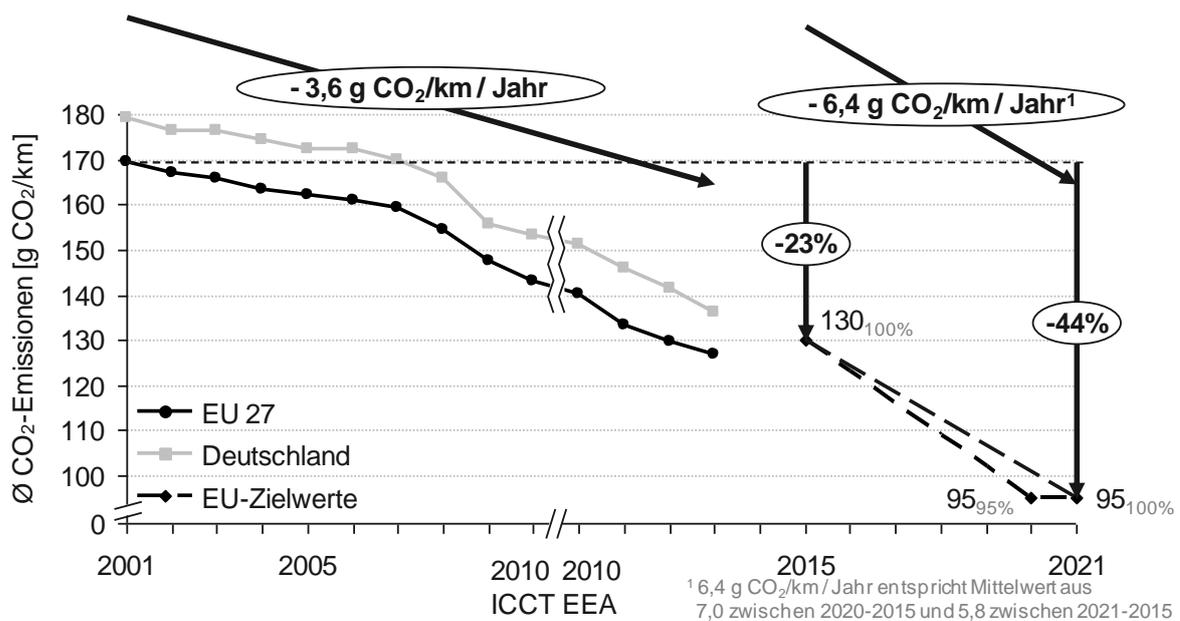


Abb. 4-7: Entwicklung der CO₂-Emissionen in der EU [EEA14] [ICC13a]

Da für leichte Nutzfahrzeuge derzeit noch kein offizielles Monitoring etabliert wurde, gibt es hier noch keine belastbaren Zeitreihen zur Ableitung von entsprechenden Trends. Eine entsprechende detaillierte Analyse realistischer Größenordnungen der CO₂-Flottenemissionen für LNF ist in [ERN13] erfolgt und bestimmt diese zu 187 g CO₂/km für das Jahr 2011.

4.1.1.5 Diskussionsstand zur CO₂-Regulierung post 2020

Der Rat und das Europäische Parlament haben die EU-Kommission beauftragt, die Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und 510/2011 bis Ende 2015 zu überprüfen und Vorschläge zur

Änderung der Rechtsakte vorzulegen, einschließlich der möglichen Festlegung von realistischen und erreichbaren Flottenzielwerten für neue Pkw und für leichte Nfz für die Zeit nach 2020, [EUR14b] [EUR14c]. Die EU-Kommission hat erklärt, dass sie als indikativen Untersuchungsrahmen für die Weiterentwicklung der CO₂-Regulierung bis 2025 eine Folgenabschätzung für einen Zielkorridor von 68 – 78 g CO₂/km durchführen wird [EUR14]. Verschiedene Interessensgruppen und Verbände haben Vorschläge für Flottenzielwerte unterbreitet, die in der folgenden Abb. 4-8 zusammengefasst werden. An dieser Stelle soll keine wissenschaftliche Analyse dieser Vorschläge und der jeweils dahinterliegenden Methodik zur Ableitung der Ziele erfolgen, sondern nachvollziehbar hergeleitete Zielvorschläge der von der EU-Kommission geprüften Zielbandbreite gegenübergestellt werden.

Der ursprünglich anvisierte Zielwert von 95 g CO₂/km im Jahr 2020 entsprach einer durchschnittlichen Minderung um 7 g CO₂/km (5,4 %) pro Jahr gegenüber dem Zielwert von 130 g CO₂/km im Jahr 2015. Diese wurde durch die politisch vereinbarte Zielverschiebung auf Ende 2020 auf eine durchschnittliche Minderung um 6,4 g CO₂/km (4,9 %) pro Jahr reduziert. Der von der EU-Kommission herangezogene Vorschlag zum Zielkorridor in Höhe von 68-78 g CO₂/km für das Jahr 2025 entspricht im Wesentlichen einer Fortsetzung des im Zeitraum 2012/2015 bis 2020/2021 verordneten linearen Minderungspfades bis 2025. Die von der EU-Kommission geprüfte Zielbandbreite für 2025 würde eine durchschnittliche Minderung um 3,8 bis 6,1 g CO₂/km (4,0 % bis 6,4 %) pro Jahr gegenüber dem Zielwert von 95 g CO₂/km Ende 2020 erfordern. Die in Abb. 4-8 skizzierten Vorschläge für den Zeithorizont bis 2030 und 2040 entsprechen ebenfalls einer linearen Zielfortschreibung mit einer jährlichen Optimierung von ca. 5,1 g CO₂/km, wobei dann im Jahr 2040 ausschließlich emissionsfreie Fahrzeuge, z.B. BEV oder FCEV, angenommen werden.

Autor / Veröffentlichung	Flottenzielwert [g CO ₂ /km]				Quelle	
	2025		2030			2040
ULMER, T. MDEP; HALL, F. MDEP	68-78				-	[ULM13]
	Ø6,1-3,8/a	6,4-4,0%				
WWF, BUND, German- watch, NABU, VCD Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland	65-68		50		Fokus Elektrofzg. [0]	[ERH14]
	Ø6,8-6,1/a	7,1-6,4%	Ø4,8/a	5,0%	Ø4,9/a	
Transport & Environment Reducing CO ₂ emissions from road vehicles	60				-	[T&E11]
	Ø7,9g/a	8,3%				
Greenpeace CO ₂ Consultation	60				Emissionsfreie Fzge. [0]	[ACH11]
	Ø7,9g/a	8,3%			Ø4,9/a	

Ø Minderung pro Jahr gegenüber 95 g CO₂/km Ende 2020 absolut in [gCO₂/km] und relativ in [%]

Abb. 4-8: Diskussionsstand zur CO₂-Regulierung post 2020

4.1.2 Internationaler Vergleich der CO₂-Regulierung

In allen wichtigen Automobilmärkten außerhalb der EU mit Ausnahme von Russland wurden ebenfalls CO₂-Gesetzgebungen oder sonstige Regulierungen der Treibhausgasemissionen oder des Kraftstoffverbrauchs von leichten Kraftfahrzeugen implementiert bzw. beschlossen, vgl. Abb. 7-6. Insbesondere global agierende Automobilhersteller sehen sich daher vielfältigen legislativen Zielvorgaben gegenüber.

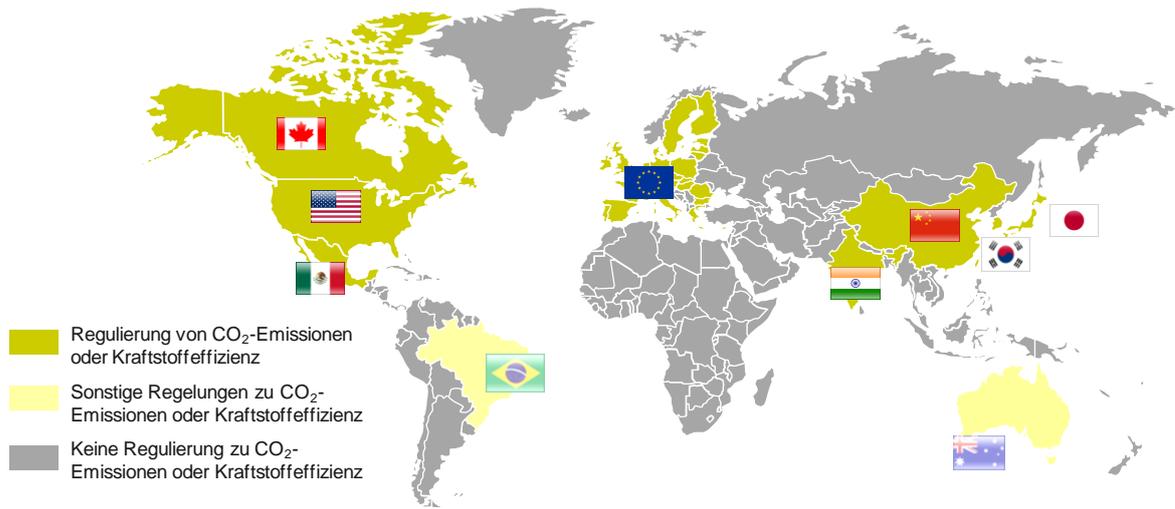


Abb. 4-9: Global implementierte CO₂-Regularien

In den Triade- und BRIC-Staaten findet in den kommenden Jahren eine Verschärfung oder Einführung von CO₂-Emissionsgrenzwerten bzw. Effizienzgrenzwerten oder Kraftstoffverbrauchsvorgaben statt, vgl. Abb. 4-10.

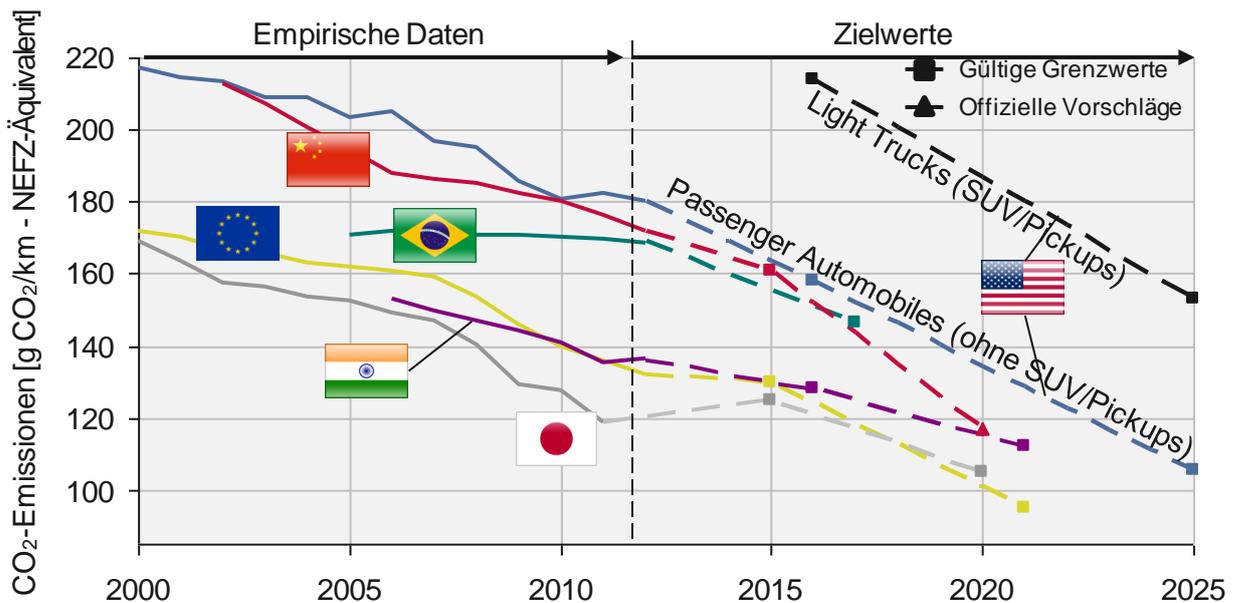


Abb. 4-10: Vergleich der durchschnittlichen CO₂-Flottenemissionen und Roadmap der Zielvorgaben für Pkw (in Anlehnung an [ICC14])

International gesehen sind bei Pkw in der EU bis 2020/21 mit 95 g CO₂/km die strengsten CO₂-Grenzwerte implementiert, gefolgt von Japan, Indien und China. Im internationalen Vergleich sind die CO₂-Zielwerte in den USA relativ hoch, stellen vor dem Hintergrund der spezifischen Flottenzusammensetzung jedoch ebenfalls ambitionierte Vorgaben dar. Einzig die CO₂-Gesetzgebung in den USA ist bereits bis zum Jahr 2025 definiert und setzt – unter dem Vorbehalt der Überprüfung im Jahr 2018 – entsprechend konkrete Zielwertvorgaben.

Beim Vergleich der internationalen CO₂-Grenzwerte ist zu berücksichtigen, dass die CO₂-Emissionen von Pkw in den verschiedenen Staaten auf teilweise sehr unterschiedlichem Ausgangsniveau liegen. Dies ist insbesondere durch die national unterschiedliche Struktur des Fahrzeugmarktes bedingt. Dabei muss einerseits die Verteilung der Fahrzeugsegmente (Def., vgl. Kap. 4.2.1) und der Kraftstoffmix berücksichtigt werden, vgl. Abb. 4-11. Neben den dargestellten strukturellen Daten beeinflusst das technische Ausgangsniveau eines jeden Marktes ebenfalls die Flottenemissionen, so z.B. Leistung, Motorbauart, Getriebetyp.

		SEG-1 [%]	SEG-2 [%]	SEG-3 [%]	Dieselanteil [%]
EU		38	57	5	Ca. 50
USA		6	85	9	Ca. 1
Japan		18	77	5	< 1
China		10	88	2	< 1
Indien		55	44	1	Ca. 50
Brasilien		70	29	1	0

Abb. 4-11: Globaler Überblick zur Marktstruktur nach Fahrzeugsegment und Kraftstoff [IHS14] [BOS13]

Der Markt der leichten Nutzfahrzeuge bzw. dessen internationale Entsprechung wird durch CO₂-Regulierungen weniger weitreichend abgedeckt. So existieren lediglich in den USA sowie in Europa Zielwertvorgaben für 2020, wobei in der EU die strengeren Zielwertvorgaben implementiert sind, vgl. Abb. 4-12. Das NEFZ-Äquivalent des japanischen Grenzwertes liegt zwar bereits 2015 unter den EU-Zielwertvorgabe für 2020, dies ist jedoch vor dem Hintergrund der spezifischen japanischen Flottenzusammensetzung mit einem hohen Anteil von in Europa nicht verbreiteten sehr leichten Nutzfahrzeugen auf Kleinstfahrzeugbasis zu interpretieren und kann deshalb nur eingeschränkt für Quervergleiche herangezogen werden.

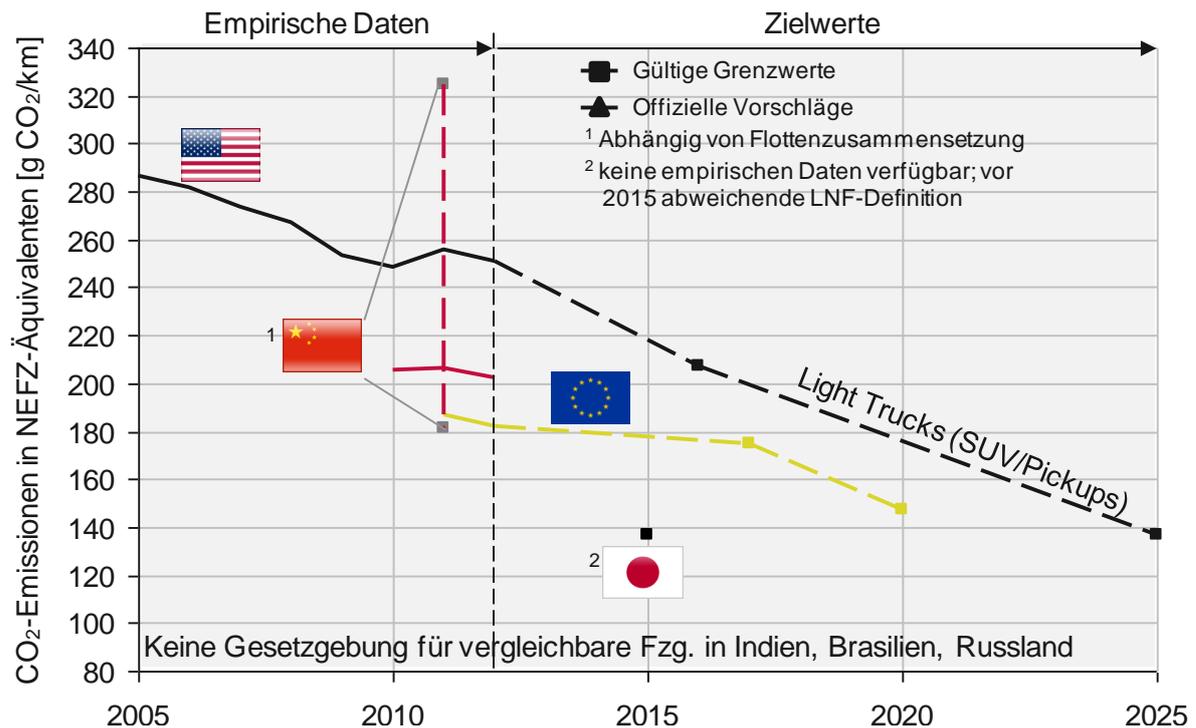


Abb. 4-12: Vergleich der durchschnittlichen CO₂-Flottenemissionen und Roadmap der Zielvorgaben für LNF (in Anlehnung an [ICC14])

Die CO₂-Regulierung in den einzelnen Staaten unterscheidet sich sowohl im Hinblick auf die Zielwerte als auch in der Ausgestaltung der entsprechenden Regulierungen, siehe Abb. 4-13. So gibt es grundsätzliche Unterschiede wie den Regulierungsgegenstand, die Differenzierungsparameter sowie die Definition der Grenzwerte. Auch bei der Definition der Fahrzeugklassen sowie dem verwendeten Fahrzyklus unterscheiden sich die Gesetzgebungen der einzelnen Länder deutlich. Diese Unterschiede können z.T. eine erhebliche Bedeutung für das relative Ambitionsniveau der einzelnen CO₂-Regime erlangen und werden in den vorstehenden Abb. 4-10 und Abb. 4-12 nicht visualisiert. Der auf den NEFZ normierte Vergleich der Flottenzielwerte erlaubt daher nur eine erste Näherungsaussage über das relative Zielniveau unterschiedlicher CO-Regime und bedarf stets einer ganzheitlichen Sichtweise mit einer Berücksichtigung der konkreten Zielerreichungsmodalitäten. Im internationalen Vergleich lässt sich festhalten, dass in den CO₂- bzw. Kraftstoffeffizienz-Gesetzgebungen der USA die weitreichendsten Ansätze zur Flexibilisierung der herstellerindividuellen Zielerreichung implementiert sind, vgl. Abb. 4-13. Während in der EU lediglich Ökoinnovationen eine begleitende technologische Möglichkeit zur CO₂-Zielerreichung darstellen, ergeben sich in den USA durch die entsprechenden „Off-Cycle Credits“ weiterreichende technologische Optionen. So können Verbesserungen an Klimaanlage, z.B. durch Reduzierung der Leckagerate sowie durch Einsatz alternativer Kältemittel, hohe Emissionsgutschriften bewirken.

Kriterium	 Europa	 USA	 Japan	 Brasilien	 Indien	 China
Regulierungsgegenstand	CO ₂ -Emissionen [g CO ₂ /km]	CO ₂ -Emissionen [g CO ₂ /Meile] + Kraftstoffeffizienz [mpg]	Kraftstoffeffizienz [km/l]	Energieeffizienz [MJ/km]	Kraftstoffeffizienz [l/100 km]	Kraftstoffeffizienz [l/100 km]
Differenzierungsparameter	Fahrzeugmasse	Fahrzeugstandfläche	Fahrzeugmasse	Fahrzeugmasse	Fahrzeugmasse	Fahrzeugmasse
Definition der Grenzwerte	Kontinuierlich	Kontinuierlich	Gewichtsklassen	Kontinuierlich	Kontinuierlich	Gewichtsklassen
Fahrzeugklassen	Getrennt nach Pkw und LNF	Getrennt nach PAs (Pkw) und LTs (LNF)	Getrennt nach Pkw und LNF + Bis 2015 getrennt nach Kraftstoffart	Keine Angaben	Getrennt nach Pkw und LNF	Bis 2015 getrennt nach Getriebeart und Fahrzeugklasse
Fahrzyklus	NEFZ ab 2017 WLTP gepl.	55 % FTP-75 45 % HWFET	JC 08	FTP-75	NEFZ, für leistungsarme Kfz	NEFZ
Ökoinnovationen/ technologische Flexibilisierung	Berücksichtigung von nichtim Fahrzyklus erfassten technischen Innovationen	Berücksichtigung von nichtim Fahrzyklus erfassten technischen Innovationen	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	Ab 2016 Berücksichtigung von nichtim Fahrzyklus erfassten technischen Innovationen
Supercredits/ mehrfache Anrechnung	Kfz mit Emissionen ≤ 50 g CO ₂ /km Faktor: 1,3 - 3,5	EPA: BEV, FCEV, PHEV, CNG; Faktor: 1,3 – 2 NHTSA: FCEV, CNG; mpg-Kraftstoffeffizienz * 6,67	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	BEV, PHEV, FCEV, Kfz ≤ 2,8 l/100 km; Faktor: 1,5 – 5
Banking / Borrowing (Zeitliche Flexibilität)	Keine Angaben	NHTSA: Ansparen über 5 Jahre, Ausgleich der letzten 3 Jahre EPA: zusätzlich Einsatz von Credits aus 2010-2016	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	Grenzwertüberschreitung kann Überschreitung in den nächsten 3 Jahren ausgleichen
Strategische Flexibilität	Pooling von Herstellern + Sonderregelungen für kleine Hersteller	Credits zwischen Fahrzeugklassen übertragbar + Handel von Credits zwischen Herstellern + Sonderregelungen für kleine Hersteller	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben

Abb. 4-13: Übersicht der CO₂-Gesetzgebungen [EUR09] [EPA10] [DIE14] [ICC13] [UNE10] [GOI14] [MAR14] [SAC14]

Hervorzuheben ist ebenfalls, dass in der US CO₂-Gesetzgebung Mechanismen zur zeitlichen Flexibilisierung der Zielerreichung implementiert sind, welche in dieser Form in der EU derzeit nicht existieren. So ist es in den USA im Rahmen eines sogenannten „Banking-Borrowing-Systems“ möglich, CO₂-Zielwertverfehlungen in einzelnen Perioden durch eine entsprechend Übererfüllung in einer weiteren Periode auszugleichen, was den Fahrzeugherstellern mehr Flexibilität bezüglich der Produktportfolioplanung gewährt und dennoch langfristig die CO₂-Gesamtzielerreichung sicherstellt.

Darüber hinaus können die Hersteller in den USA eine Zielverfehlung im Pkw-Segment durch entsprechende Übererfüllung bei leichten Nutzfahrzeugen ausgleichen und umgekehrt (transfer of credits). Angesichts des nicht sonderlich ambitionierten Verbrauchsstandards für leichte Nutzfahrzeuge (Pick-up trucks) und der höheren Marktanteile von US-Herstellern in diesem Segment könnte sich die Regelung für diese im Pkw-Segment als vorteilhaft erweisen.

Die CO₂-Regulierung in den USA ermöglicht den Herstellern durch die Schaffung des entsprechenden rechtlichen Rahmens zusätzliche strategische Möglichkeiten der CO₂-Zielwert-erreichung. Während in Europa grundsätzlich jede Fahrzeugherstellergruppe ihre CO₂-Flottenemissionsziele individuell erreichen muss und nur in begrenztem Umfang die Möglichkeit zur Bildung von „Pools“ zur gemeinsamen CO₂-Zielwert-erreichung besteht, ist in den USA prinzipiell der freie Handel von CO₂-Emissionscredits zwischen den regulierten Fahrzeugherstellern möglich. Zertifikate für Zielwertunterschreitungen können damit nicht nur zeitlich, sondern auch zwischen den Fahrzeugherstellern transferiert werden. Diese strategische Option bietet die Möglichkeit der Senkung der Zielerreichungskosten für die Fahrzeughersteller und stellt zudem die CO₂-Gesamtzielerreichung für den Gesamtmarkt sicher.

4.1.3 Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Testing Procedure (WLTP)

Gegenwärtig erfolgt die Ermittlung der CO₂-Emissionen im Rahmen des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) und der entsprechenden Prüfprozeduren. Dieser soll mittelfristig durch die „Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure“ WLTP-Prüfprozedur abgelöst werden, um eine international vereinheitlichte CO₂-Emissionsmessung bei Pkw und LNF zu erreichen und die Höhe der CO₂-Emissionen bzw. den Kraftstoffverbrauch für Endkunden realitätsnäher auszuweisen.

Nach Fertigstellung der WLTP-Prüfprozedur soll diese auf europäischer Ebene sukzessive in die Gesetzgebung implementiert werden, was insbesondere eine Anpassung der Richtlinien zur Typgenehmigung und der CO₂-Flottenziele nach sich zieht. Momentan basieren diese Vorschriften auf dem NEFZ. Ab dem Jahr 2017 soll die neue Prüfprozedur in Europa eingesetzt werden, wobei die genaue Implementierung des neuen Prüfverfahrens derzeit noch nicht definiert ist. So ist es denkbar, dass das neue Verfahren zunächst nur im Rahmen von Verbraucherinformationen (CO₂-Labelling) genutzt wird und erst später für das Emissionsmonitoring im Rahmen der CO₂-Gesetzgebung. Für die CO₂-Gesetzgebung ist auch eine Übergangsphase mit gleichzeitiger Nutzung von NEFZ und WLTP und entsprechenden Um-

rechnungen denkbar. Voraussichtlich wird es im WLTP zu höheren durchschnittlichen CO₂-Emissionen im Zyklus kommen. Zur Vermeidung einer impliziten Verschärfung der CO₂-Zielwertvorgaben wird derzeit eine Lösung diskutiert, die einen Korrelationsfaktor zwischen NEFZ und WLTP vorsieht. Die EU-Kommission teilte mit, dass es durch die Einführung eines neuen Verbrauchsmessverfahrens nicht zu einer indirekten Zielverschärfung kommen soll [AUT13].

Die nachfolgende Darstellung des Zyklus (WLTC) sowie der Messprozedur (WLTP) beruht auf dem Diskussionsstand in den jeweiligen WLTP-Arbeitsgruppen sowie insbesondere auf den im November 2013 von der „Working Party on Pollution and Energy“ bestätigten und im März 2014 von der UNECE angenommenen Entwurf der künftigen „Global Technical Regulation“ (GTR) [UNE13]. Einige Aspekte der WLTP-Prüfprozedur werden jedoch erst im Rahmen zukünftiger Ergänzungen der GTR präzisiert. Auf diese Aspekte wird an den relevanten Stellen dieses Kapitels eingegangen. Abschließend werden in einem Unterkapitel die Kernergebnisse einer Wirksamkeitsanalyse technologischer Maßnahmen beim Wechsel von der NEFZ- zur WLTP-Prüfprozedur diskutiert.

4.1.3.1 Testzyklus (WLTC)

Auf Basis empirischer Daten über das Fahrverhalten in den beteiligten Regionen wurde ein Fahrzyklus errechnet, welcher hinsichtlich wesentlicher Kennwerte wie Beschleunigungsverhalten, Geschwindigkeiten, Fahrzeugstillstandszeiten usw. repräsentativ in allen beteiligten Regionen sein soll. Der gesamte Fahrzyklus wird gemäß der erreichten Höchstgeschwindigkeit in die Segmente Low, Middle, High und Extra-High unterteilt. Grundsätzlich werden im Rahmen der WLTP-Prüfprozedur spezifische Testzyklen für Fahrzeuge mit unterschiedlichem Leistungsgewicht definiert. Praktisch alle in Europa verfügbaren Pkw und LNF werden gemäß der technischen Kriterien in die höchste WLTC-Klasse 3b eingeordnet, bestehend aus den Phasen Low, Middle, High und Extra-High, vgl. Abb. 4-14.

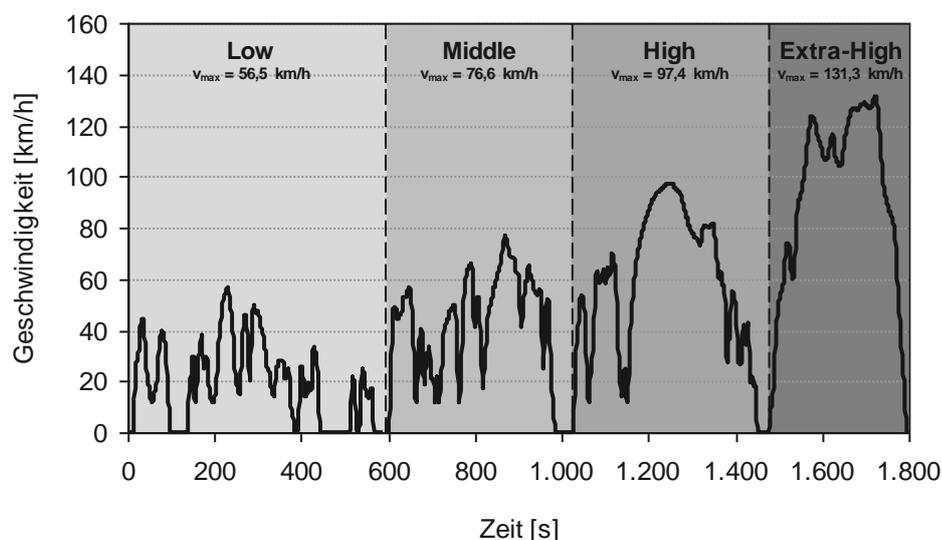


Abb. 4-14: Geschwindigkeit-Zeit-Profil WLTC Klasse 3b [UNE13]

Grundsätzlich bildet der WLTC ein dynamisches Fahrprofil ab, bei dem die Phasen der Beschleunigung, Verzögerung und Stillstand abgebildet werden. Längere Phasen der Konstantfahrt, wie sie vor allem im NEFZ zu finden sind, kommen nur in geringem Maße mit einer Dauer von wenigen Sekunden vor.

Im Vergleich zum NEFZ verfügt der WLTC über ein dynamischeres Fahrprofil, eine längere Gesamtdauer und gefahrene Strecke bei einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit. Zudem wird eine größere Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung erreicht. Abb. 4-15 vergleicht zusammenfassend wesentliche Charakteristika des WLTC mit dem NEFZ.

	NEFZ		WLTC Klasse 3b	
Phasen (Zeitanteile)	▪ Beschleunigung	21 %	▪ Beschleunigung	44 %
	▪ Verzögerung	12 %	▪ Verzögerung	40 %
	▪ Stillstand	27 %	▪ Stillstand	12 %
	▪ Konstantfahrt	40 %	▪ Konstantfahrt	4 %
Dauer	20 min.		30 min.	
Strecke	ca. 11 km		ca. 23 km	
Ø – Geschwindigkeit	33,6 km/h		46,5 km/h	
v_{\max}	120 km/h		131 km/h	
a_{\max}	1,04 m/s ²		1,67 m/s ²	
a_{\min}	-1,39 m/s ²		-1,47 m/s ²	

Abb. 4-15: Vergleich der Charakteristika des NEFZ und WLTC

4.1.3.2 Testprozedur (WLTP)

Auch bezüglich der Rahmenbedingungen wird angestrebt, realitätsnahe, vergleichbare und manipulationssicher definierte Rahmenbedingungen zur Emissionsmessung zu schaffen. Die wichtigsten Bestimmungen umfassen hierbei Regelungen zur Prüfmasse, der sonstigen Fahrwiderstände, der Kalkulation von PHEV sowie der Berücksichtigung von Zusatzverbrauchern, vgl. Abb. 4-16.

Insbesondere die Definition der Prüfmasse wurde im WLTP im Vergleich zur NEFZ-Prozedur wesentlich verfeinert. So beinhaltet die Prüfmasse des individuellen Fahrzeuges auch die tatsächlich verbaute Sonder- und Zusatzausstattung sowie eine pauschal angesetzte Zusatzmasse in Höhe von 15 % der maximal zulässigen Zuladung bei Pkw bzw. 28 % bei LNF. Während demnach die massebezogenen Fahrwiderstände im WLTP erhöht werden, bleiben die sonstigen Fahrwiderstände in einer ähnlichen Größenordnung. Durch insgesamt detailliertere Bestimmungen wird die Möglichkeit der Ausnutzung definitorischer Lücken durch die Fahrzeughersteller jedoch minimiert. Zusatzverbraucher werden während des Testzyklus

nicht betrieben, wobei derzeit in einer gesonderten „Informal Working Group“ Regularien bezüglich Testprozeduren mobiler Klimaanlage ausgearbeitet werden, auf welche mittelfristig auch bei der Zertifizierung von Pkw und LNF Rückgriff genommen werden soll.

	NEFZ	WLTP
Prüfmasse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fahrzeugleergewicht mit Fahrer (68 kg) und Zuladung von 7 kg – Zusammen: 75kg ▪ Einstellung der äquivalenten Schwungmasse am Prüfstand in Stufen von bis zu 50 kg Breite. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fahrzeugleergewicht mit Fahrer (75 kg), mit optionaler Ausstattung und Zuladung i.H.v. 15 % der zul. Zuladung. ▪ Stufenlose Einstellung der äquivalenten Schwungmasse am Prüfstand.
Sonstige Fahrwiderstände	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definition weniger detailliert 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zertifizierung innerhalb einer CO₂-Fahrzeugfamilie
Berechnungsvorschrift PHEV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kombination des rein elektrischen Verbrauchs mit einer angenommen verbrennungsmotorisch unterstützten Weiterfahrt von 25 km 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verrechnung von Charge Sustaining und Charge Depleting-Modus über reichweitenabhängige Nutzungsfaktoren
Zusatzverbraucher	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Berücksichtigung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Berücksichtigung

Abb. 4-16: Zentrale Anpassungen der WLTP-Prüfprozedur

Weitreichende Änderungen im WLTP betreffen ferner die Zertifizierung von Plug-in-Hybriden. Grundsätzlich müssen PHEV im Charge-Depleting (CD) und Charge-Sustaining (CS) Betriebsmodus getestet werden. Der Charge-Depleting-Modus ist dadurch gekennzeichnet, dass der Ladezustand der Batterie zwar schwanken kann, im Mittel aber sinkt. Im Charge-Sustaining-Modus sind ebenso Schwankungen der Batterieladung möglich, im Mittel bleibt der Ladezustand jedoch konstant. Diese Begriffe sind daher nicht in allen Fällen deckungsgleich mit dem des rein batterieelektrischen bzw. verbrennungsmotorisch unterstützten Betriebsmodus. Der Kraftstoffverbrauch bzw. die CO₂-Emissionen aus CD-Test und CS-Test werden über Nutzungsfaktoren (engl. Utility Factors) unterschiedlich gewichtet und miteinander verrechnet, um die entsprechenden kombinierten Werte für ein PHEV zu bestimmen.

4.1.3.3 Wirksamkeitsanalyse technologischer Maßnahmen im WLTC

Technologische Maßnahmen adressieren einen oder mehrere Lastbereiche oder Fahrwiderstände, um die zyklusbezogenen CO₂-Emissionen zu verringern. Auf Basis der beschriebenen Bedeutungsverschiebung der einzelnen Lastzustände bzw. Fahrwiderstände im WLTC lässt sich durch eine Zuordnung der technologischen Maßnahmen zu diesen Lastzuständen bzw. Fahrwiderständen die tendenzielle veränderte Wirksamkeit im WLTC ableiten, vgl. Abb. 4-17. Für eine ausführliche technische Analyse der identifizierten Trends wird auf den Anhang der Studie verwiesen.

		Lastzustand					Fahrwiderstand			Technologie- bewertung im WLTC gegenüber dem NEFZ
		Fahrzeugstillst.	Niedrige Last	Mittlere Last	Hohe Last	Verzögerung	Beschl.-Widerst.	Rollwiderstand	Luftwiderstand	
Technologie		↓	↓	↑	↑	↑	→	↓	↑	
Motor	Direkteinspritzung (homogen)	-	x	x	x	-	-	-	-	→
	Downsizing	-	x	x	-	-	-	-	-	→
	Hochlast-AGR	-	-	-	x	-	-	-	-	→
	HCCI/ CAI	-	-	x	-	-	-	-	-	→
	Variable Ventilsteuerung	-	x	x	x	-	-	-	-	→
	Zylinderabschaltung	x	x	-	-	-	-	-	-	↓
	Variable Verdichtung	-	x	x	-	-	-	-	-	→
Getriebe	Getriebetechnologien: Getriebeoptimierung, Autom. Schaltgetriebe, Stufenloses Getriebe, Doppelkupplungsgetriebe, 7/8/9-Gang-Automatik	x	Übergreifend			(x)	(x)	(x)		→
Elektrifiz.	Micro-Hybrid	x	-	-	-	-	-	-	-	↓
	Mild-Hybrid	transientes Fahrprofil im WLTP ermöglicht grundsätzlich vermehrte Rekuperation								↑
	Full-Hybrid	abhängig von Batteriekapazität								→
	Plug-in-Hybrid / Range Extender									→
Überg.	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	Übergreifend				-	-	-	-	→
	Wärmeenergie-Rückgewinnung	Übergreifend				-	-	-	-	↑
	Reibungsreduzierung Antriebsstrang	Übergreifend				-	-	-	-	→
	Thermomanagement	Übergreifend				-	-	-	-	→
Fahrw.	Aerodynamik (Optimierung und Design)	-	-	-	-	-	-	x	-	↑
	Leichtbau (Karosserie und Komponenten)	-	-	-	-	-	x	x	-	→
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	-	-	-	-	-	-	x	-	↓

Abb. 4-17: Wirksamkeitsanalyse der Technologien im WLTC gegenüber dem NEFZ

Da der Prüfzyklus WLTC durch höhere Durchschnitts- und Endgeschwindigkeiten sowie durch längere und stärkere Beschleunigungsphasen gekennzeichnet ist, erhöht sich im Vergleich zum NEFZ der Anteil von Phasen mit hoher Motorlast. Der Anteil von Phasen mit niedrigen und mittleren Lastzuständen geht dagegen leicht zurück und der Anteil der Stillstandphasen stark zurück. Entsprechend gewinnen oder verlieren jene technologischen Maßnahmen an Bedeutung, welche auf diese Lastbereiche abzielen.

Die Wirksamkeit von **Plug-in-Hybriden** im WLTP wird im Wesentlichen durch die Berechnung der kombinierten CO₂-Emissionen aus Charge-Depleting- und Charge-Sustaining-Phase bestimmt. Simulationsberechnungen mit einem Beispielfahrzeug auf Basis der für Europa vorgesehenen Utility-Faktoren zeigen, dass im Bereich kleiner Batteriekapazitäten und somit geringer elektrischer Reichweiten die berechneten CO₂-Emissionen im WLTP über jenen im NEFZ liegen. Bei größeren Batteriekapazitäten hingegen wirkt sich die Berechnungsmethodik dahingehend aus, dass das Fahrzeug im WLTP mit geringeren CO₂-Emissionen ausgewiesen wird als im NEFZ. Zur Erhöhung der Transparenz werden für die WLTP zwei Berechnungsergebnisse aufgeführt. Zum einen wird das Fahrzeug mit gemäß der definierten Prüfprozedur erhöhter Masse bzw. der erhöhten äquivalenten Schwungmasse gemessen, zum anderen mit der niedrigeren Fahrzeugmasse, wie sie im Rahmen des NEFZ spezifiziert ist. Es wird deutlich, dass die Fahrzeugmasse für die zertifizierten CO₂-Emissionen von PHEV nur eine marginale Rolle spielen.

4.2 Analyse der Märkte für leichte Kraftfahrzeuge in der EU und in DE

Im Folgenden wird ein grundlegender Überblick über die Entwicklung der Marktvolumina von Pkw und LNF, die Aufteilung der entsprechenden Märkte in einzelne Segmente und die Marktanteile der einzelnen Antriebs- bzw. Kraftstoffarten gegeben. Anschließend wird der aktuelle Status quo der CO₂-Flottenemissionen präsentiert und der aktuelle Status quo mit den legislativ festgesetzten CO₂-Flottenzielwerten für Pkw und LNF bis 2020/21 abgeglichen. Dabei wird auf die Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrzeugsegmenten eingegangen. Dieser Befund bildet die Grundlage für die Abschätzung zukünftiger CO₂-Flottenemissionen unter Anwendung der in der erweiterten Technologieanalyse zu identifizierenden Technologien und der damit verbundenen Kosten. Aufgrund unterschiedlicher Datenverfügbarkeiten wird dabei für Pkw das Referenzjahr 2010 gewählt, während bei LNF der Status quo 2011 ermittelt wird. Die Untersuchungen im weiteren Verlauf dieser Studie werden an diese Unterscheidung angepasst.

4.2.1 Zusammensetzung und Entwicklung des Pkw-Marktes in der EU

Der europäische Pkw-Markt kam im Zeitraum zwischen 2001 und 2007 auf ein Marktvolumen von über 15 Mio. Neuzulassungen pro Jahr. Ab dem Jahr 2007 haben sich die Neuzulassungen in Europa dagegen rückläufig entwickelt, siehe Abb. 4-18. Als maßgebliche Ursache hierfür gilt vor allem die Finanz- und Wirtschaftskrise [ABD11].

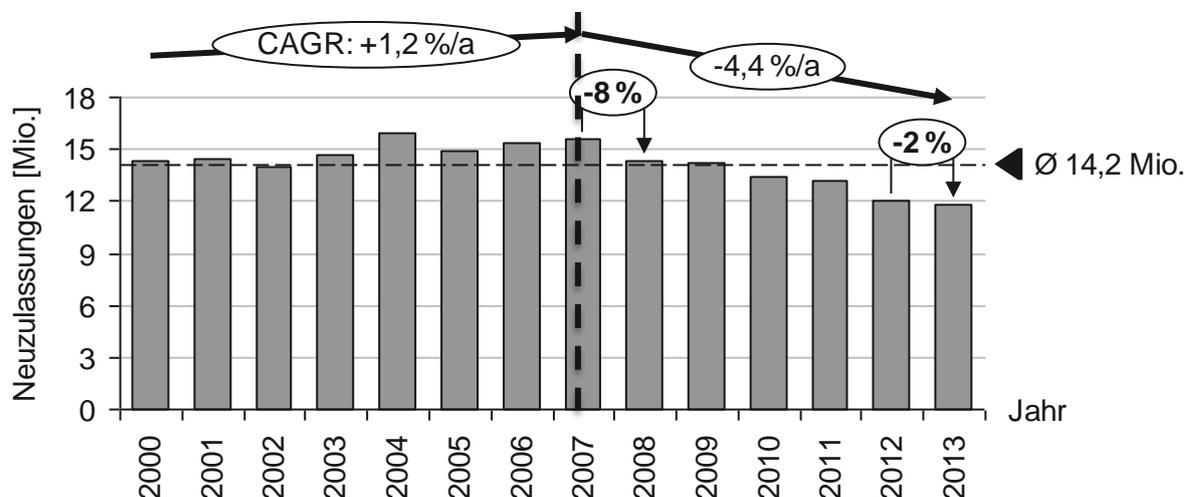


Abb. 4-18: Entwicklung der Pkw-Zulassungszahlen in der EU-27 [ACE13]

Bislang fand trotz teilweise steigender Absatzvolumina in einzelnen Teilmärkten insgesamt keine Erholung des europäischen Fahrzeugmarktes statt; vielmehr brach der Markt 2012 um nochmals 8 % ein und auch im Jahr 2013 ist eine Fortsetzung dieses Trends zu beobachten. Im Vergleich zum Vorkrisenniveau werden in der EU derzeit jährlich über 3 Mio. Pkw weniger neu zugelassen.

Der Markt für Pkw ist sehr heterogen und setzt sich nach Klassifikationen des Deutschen Kraftfahrtbundesamtes bzw. der EU-Kommission aus insgesamt neun Segmenten zusammen. In der vorhergehenden Studie „CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020“ [ERN12] werden die Segmente des europäischen Fahrzeugmarktes zur Reduzierung der Komplexität der weiteren Untersuchungen in die Segmente SEG-1 (Kleinst- und Kleinwagen), SEG-2 (Mittelklasse, obere Mittelklasse, Mehrzweckfahrzeuge, Geländewagen) und SEG-3 (Oberklasse, Luxusklasse und Sportwagen) zusammengefasst, wie Abb. 4-19 zeigt [KBA12b]. Diese Einteilung, welche unter der Maßgabe ähnlicher Plattformen und technologischer Entwicklungen vorgenommen wurde, wird in dieser Studie übernommen.



Abb. 4-19: Klassifikation und Konsolidierung der Pkw-Fahrzeugsegmente [ERN12]

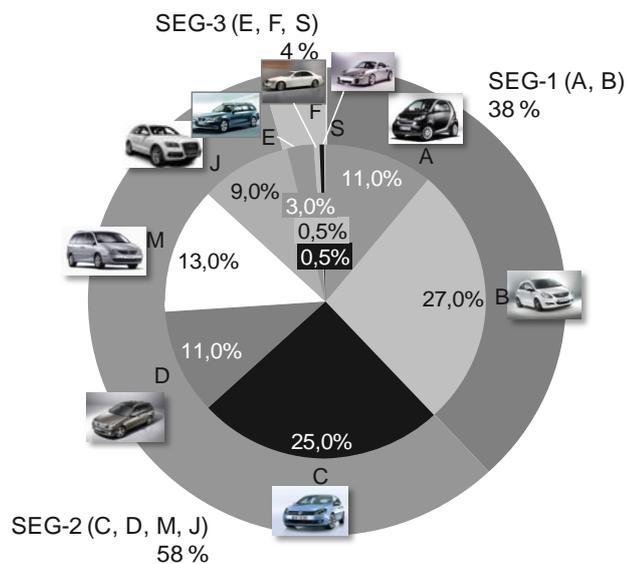


Abb. 4-20: Verteilung der Marktanteile bei Pkw 2010 [Datenbasis: EEA11] [ERN12]

Das SEG-2 ist mit etwa 58 % das volumenstärkste Segment, es wird dabei von Mittelklassefahrzeugen (KBA: Kompaktklasse) dominiert, danach folgt das Segment der Klein- und Kleinwagen mit etwa 38 %. Das SEG-3 ist zwar durch vergleichsweise hohe CO₂-Emissionen gekennzeichnet, hat EU-weit jedoch nur einen Anteil von etwa 4 % an allen Neuzulassungen.

Im Bereich der Klein- und Kleinwagen entfallen etwa zwei Drittel aller Neuzulassungen auf benzinbetriebene Fahrzeuge, in höheren Segmenten dominieren dieselbetriebene Fahrzeuge (siehe Abb. 4-21).

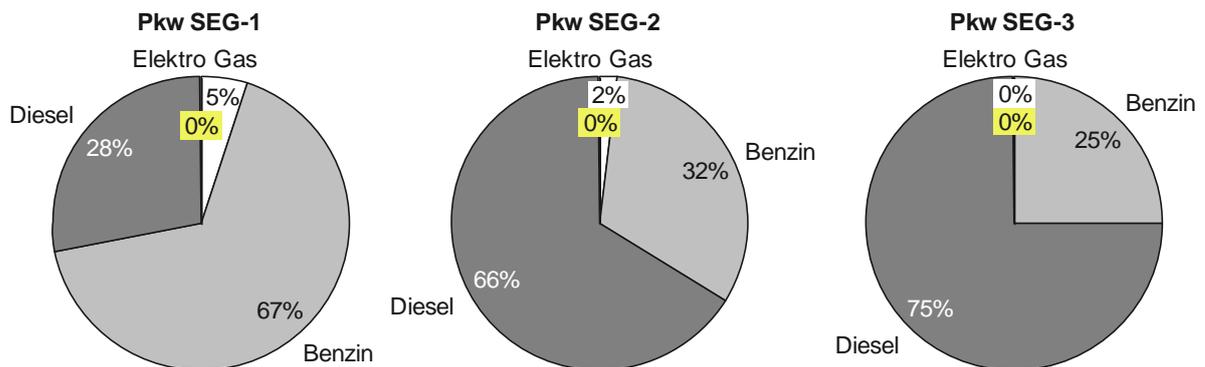


Abb. 4-21: Verteilung der Kraftstoffarten bei Pkw 2010 [Datenbasis: EEA11]

Gasfahrzeuge (LPG & CNG) erlangen bislang im Pkw SEG-1 mit etwa 5 % nennenswerte Marktanteile, wobei dieser EU-weite Durchschnittswert länderspezifisch stark unterschiedlich ist. Im Segment der Ober- und Luxusklasse konnten Gasfahrzeuge hingegen noch keine nennenswerten Marktanteile erreichen. Der Anteil von Elektrofahrzeugen geht in allen Segmenten im Basisjahr 2010 noch gegen Null (ungefähr 0,01 %).

Generell wurden in allen konsolidierten Pkw-Segmenten die durchschnittlichen CO₂-Emissionen in den vergangenen Jahren signifikant gesenkt. Über alle Segmente hinweg reduzierten sich die CO₂-Emissionen von ca. 170 g CO₂/km im Jahr 2001 auf ca. 133 g CO₂/km im Jahr 2012, vgl. Abb. 4-22.

Ein besonders starker Rückgang ist dabei nach dem Jahr 2008 zu beobachten, was einerseits auf die Konkretisierung der CO₂-Gesetzgebung unter Fixierung entsprechender CO₂-Zielwerte zurückzuführen ist. Andererseits wurde im Zuge der Finanz- und Wirtschaftskrise ein Trend hin zu kleineren und schwächer motorisierten Fahrzeugen beobachtet, der auch durch entsprechende Anreizprogramme wie der deutschen „Umweltprämie“ und ähnlicher Impulse in den anderen europäischen Staaten stimuliert wurde.

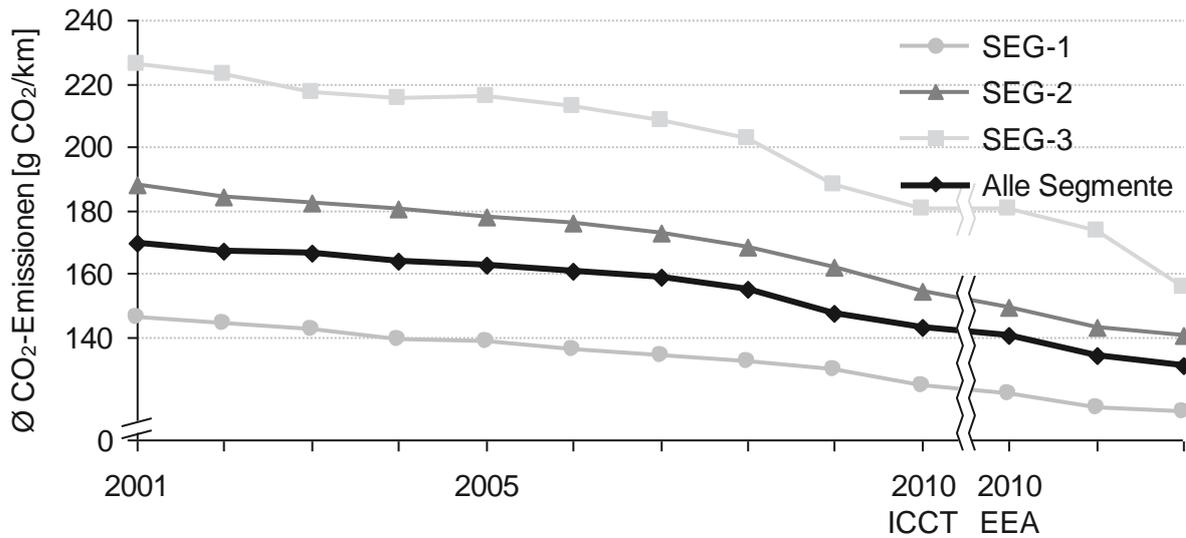


Abb. 4-22: Entwicklung der CO₂-Emissionen nach Fahrzeugsegmenten [EEA14] [ICC13a]

Für die weitere Untersuchung wurde der Status quo der CO₂-Emissionen bei Pkw durch eine Regressionsgerade auf Basis der empirischen Daten über 13 Mio. Neuzulassungen im Referenzjahr 2010 ermittelt. Daraus ergibt sich für ein durchschnittliches Neufahrzeug ein CO₂-Emissionswert von 141 g CO₂/km bei einem Durchschnittsgewicht von 1.365 kg. Im EU-Flottendurchschnitt beträgt die Lücke zur in Abb. 4-23 eingefügten Grenzwertkurve für das Jahr 2015 (durchschnittlich 130 g CO₂/km bei einer Referenzmasse von 1.372 kg) damit noch 11 g CO₂/km, zum Zielwert für das Jahr 2020/2021 (95 g CO₂/km) entsprechend noch 46 g CO₂/km. Die Regressionsgerade weist eine Steigung von 0,081 auf, während die Steigung der Grenzwertkurve für den CO₂-Flottenzielwert ab 2020/2021 auf 0,0333 abgesenkt wurde.

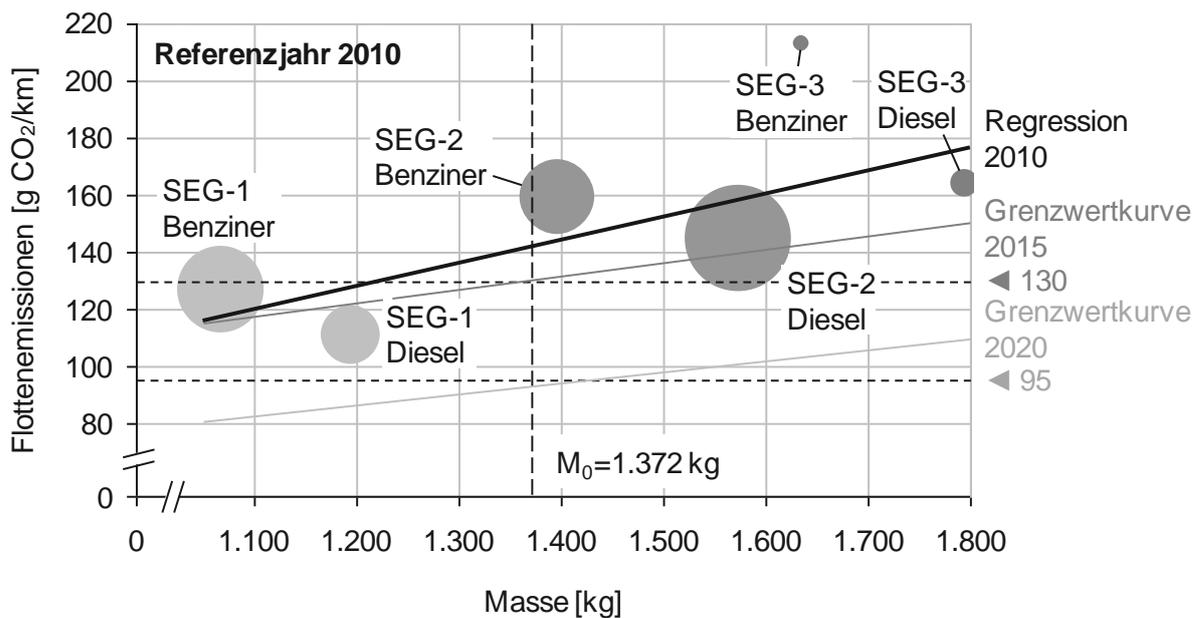


Abb. 4-23: Status quo der CO₂-Flottenemissionen bei Pkw 2010 [Datenbasis: EEA11]

Die folgende Abb. 4-24 gibt einen Überblick über die aktuellen Flottenemissionen der wichtigsten Herstellergruppen in der EU im Jahr 2013 auf Basis der vorläufigen EEA Daten, vgl. [EEA14]. Es ist aufgrund der aktuellen Entwicklung davon auszugehen, dass die meisten Fahrzeughersteller ihren Zielwert für das Jahr 2015 einhalten werden. Das gilt auch für die deutschen Fahrzeughersteller, welche im Falle von BMW und Daimler durch den Fokus auf höhere Fahrzeugsegmente tendenziell durch ein höheres Flottendurchschnittsgewicht und höhere absolute CO₂-Emissionen gekennzeichnet sind. Die Zielwerte für das Jahr 2020/2021 sind jedoch bedeutend niedriger und werden bislang von keiner Fahrzeugflotte erreicht. Da jedoch mit dem Grenzwertwechsel vom Jahr 2015 zum Jahr 2020/2021 auch eine weitere Abflachung der Grenzwertkurve erfolgt, müssen Hersteller mit schwereren Fahrzeugflotten (wie die deutschen Premiumhersteller) größere absolute und relative Minderungsleistungen erbringen als die Hersteller leichterer Fahrzeugflotten. Dies stellt sich z.B. bei einem Hersteller mit einer schwereren Flotte ($\Delta = + 300 \text{ kg}$ – vgl. Volvo) in einem um ca. 3,72 g CO₂/km schärferen Grenzwert dar. Bei einer leichteren Flotte ($\Delta = -150 \text{ kg}$ – vgl. Fiat) resultiert dies in einem um ca. 1,86 g CO₂/km entschärften Grenzwert. Durch die Abflachung der Grenzwertgeraden werden für die Hersteller Anreize zu einer veränderten Modellpolitik gesetzt, da die Emissionswerte mit leichteren Fahrzeugklassen einfach einzuhalten erscheinen.

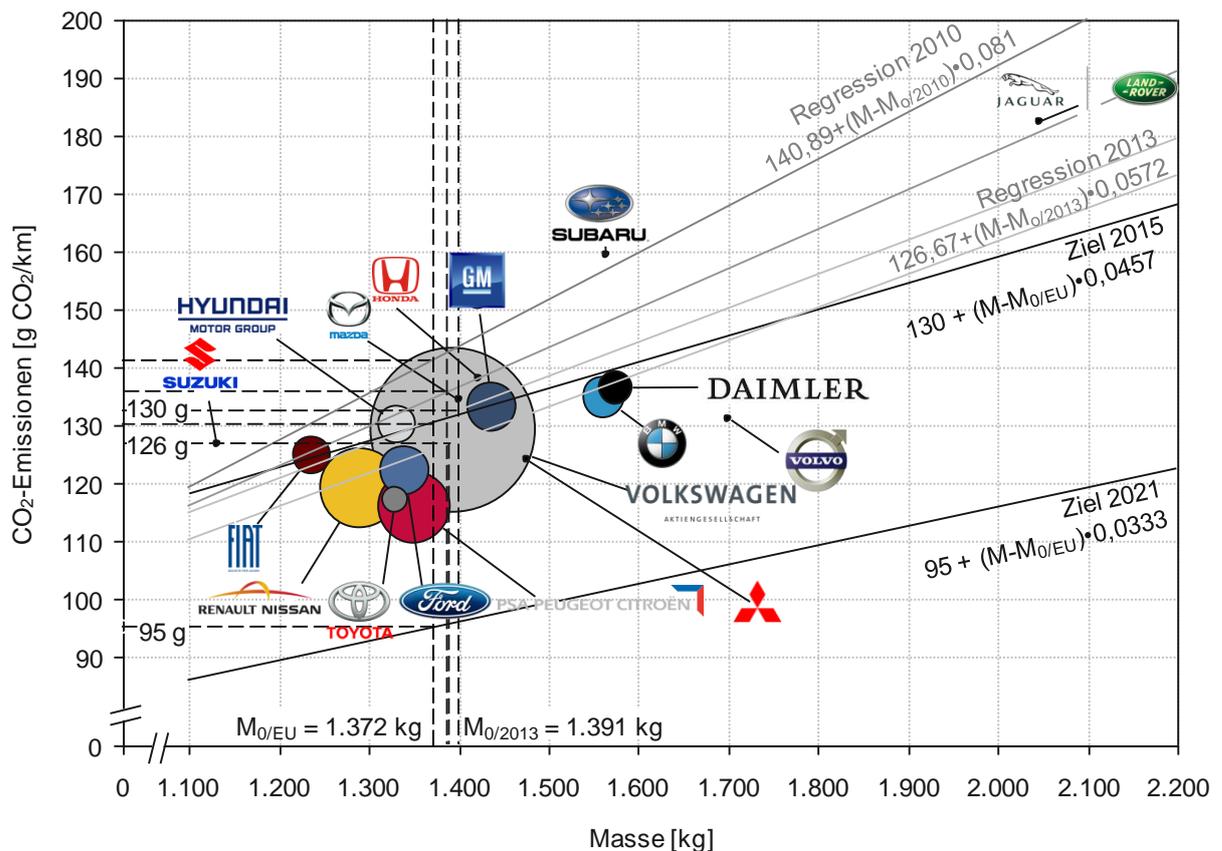


Abb. 4-24: CO₂-Flottenemissionen der Fahrzeughersteller in der EU 2013 ohne Supercredits [EEA14]

Die Fahrzeughersteller erhalten im Jahr 2013 Supercredits, wenn ein Fahrzeug weniger als 50 g CO₂/km emittiert. Der entsprechende Multiplikator beträgt für dieses Jahr 3,5. Abhängig von den Flottenanteilen der entsprechenden Fahrzeuge, entweder rein batterieelektrische Fahrzeuge oder PHEV mit hoher rein elektrischer Reichweite, ergeben sich für die Hersteller unterschiedlich hohe rechnerische Minderungen der CO₂-Flottenemissionen, vgl. Abb. 4-25.

Von den deutschen Herstellern kann Daimler mit den Marken Mercedes-Benz und Smart mit ca. 1,6 g CO₂/km die größten Minderungen der CO₂-Flottenemissionen durch Supercredits erreichen, im internationalen Vergleich unter den Volumenherstellern kann Renault mit ca. 2,9 g CO₂/km die größten Einsparungen realisieren.

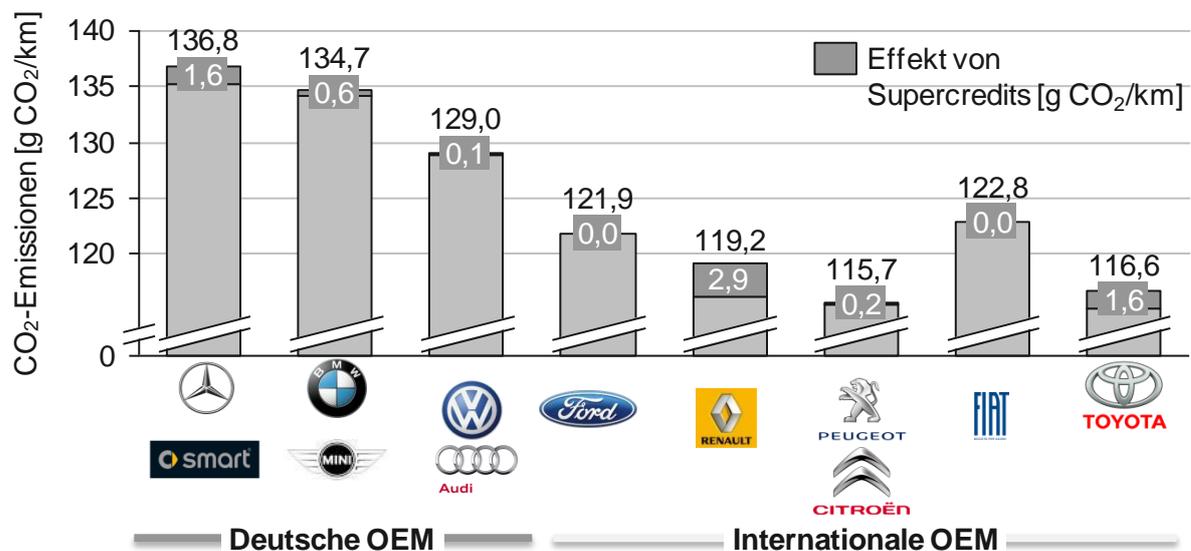


Abb. 4-25: Auswirkung von Supercredits auf die CO₂-Flottenemissionen der Hersteller im Jahr 2013 [EEA14]

4.2.2 Zusammensetzung und Entwicklung des LNF-Marktes in der EU

In der europäischen Gesetzgebung werden drei Nutzfahrzeugklassen (N1, N2 und N3) unterschieden. Einteilungskriterium ist die zulässige Gesamtmasse, wie Abb. 4-26 zeigt. Die Klasse der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) stellt dabei die leichteste Klasse mit einer zulässigen Gesamtmasse bis 3,5 t dar. LNF werden überwiegend als Dienstleistungs- und Lieferfahrzeuge im Nahverkehr eingesetzt und stellen insgesamt über drei Viertel des Nutzfahrzeugbestandes in der EU [EST13a].

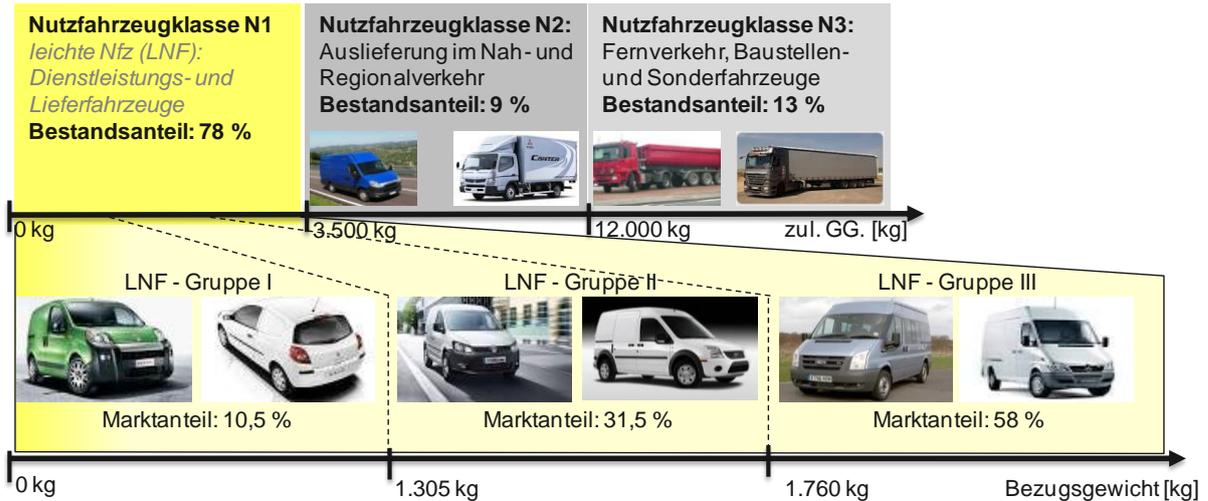


Abb. 4-26: Definition leichter Nutzfahrzeuge in der EU mit Bestandsanteilen 2010 [POL12] [EST13a]

Der europäische LNF-Markt war in den Jahren bis 2007 u.a. aufgrund der Mehrnachfrage infolge der EU-Erweiterung durch ein leichtes Wachstum gekennzeichnet. Mit der darauffolgenden Finanz- und Wirtschaftskrise brach der Absatz signifikant ein. Die im Vergleich zum Pkw-Markt beobachtbaren stärkeren Rückgänge der Absatzzahlen liegen dabei in der Käuferstruktur von LNF begründet. LNF werden nahezu ausschließlich an Gewerbetreibende verkauft [MBT10], wodurch sich die Verschlechterung der wirtschaftlichen Lage direkt niederschlug. Nach leichter Erholung des Marktes bis 2011 auf ca. 1,59 Mio. Fahrzeuge sind die Absatzzahlen 2012 erneut gesunken; vgl. Abb. 3-20.

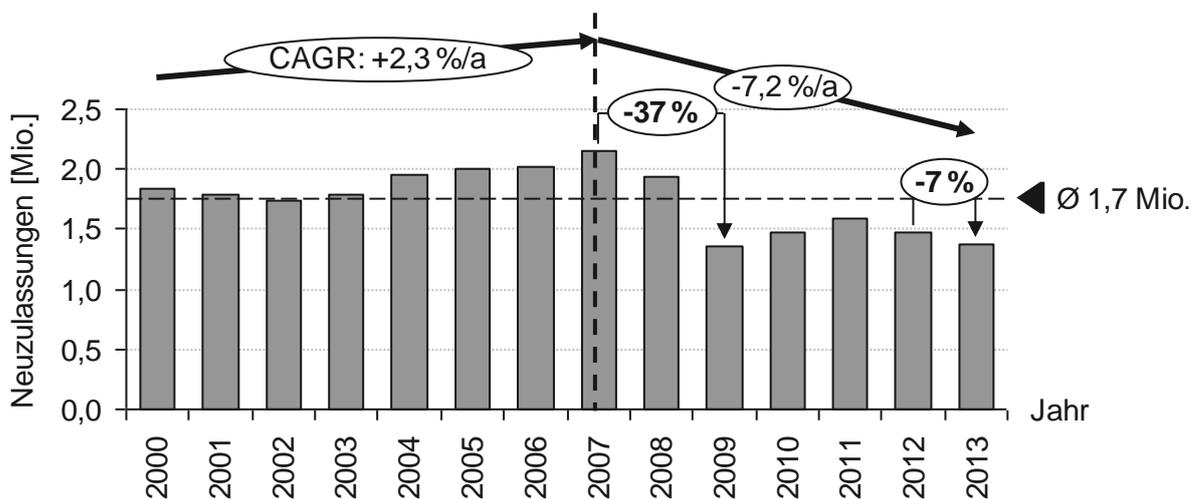


Abb. 4-27: Entwicklung der LNF-Zulassungszahlen in der EU-27 [ACE13]

Der LNF-Markt ist sehr heterogen und reicht von einfachen Nutzfahrzeug-Adaptionen im Kleinwagenbereich bis hin zu im Lieferverkehr eingesetzten, klassischen Transportfahrzeugen z.B. vom Typ Mercedes-Benz Sprinter oder Ford Transit. Während abweichend zu Pkw

keine weitere Segmentierung der LNF durch das KBA vorgenommen wird, werden LNF in EU-Verordnungen und -Richtlinien gemäß ihrer Bezugsmasse (Leergewicht + 100 kg) weiter unterteilt [EUR04].

- LNF Gruppe I mit einer Masse bis 1.305 kg
- LNF Gruppe II mit einer Masse von 1.305 kg bis 1.760 kg
- LNF Gruppe III mit einer Masse über 1.760 kg.

In allen LNF-Gewichtsgruppen sind Fahrzeuge mit Dieselmotor mit Abstand am weitesten verbreitet. Während in der Pkw-nahen LNF-Gruppe I Fahrzeuge mit Ottomotor noch einen Marktanteil von 12 % erreichen, sinkt dieser Anteil in der Gruppe III auf 0,1 %. Gasfahrzeuge (LPG & CNG) sind mit etwa 1 % Anteil an den Neuzulassungen in den Gruppen I und II zu finden, während der reine Elektroantrieb in allen Gruppen noch keine signifikanten Marktanteile erreicht, vgl. Abb. 4-28.

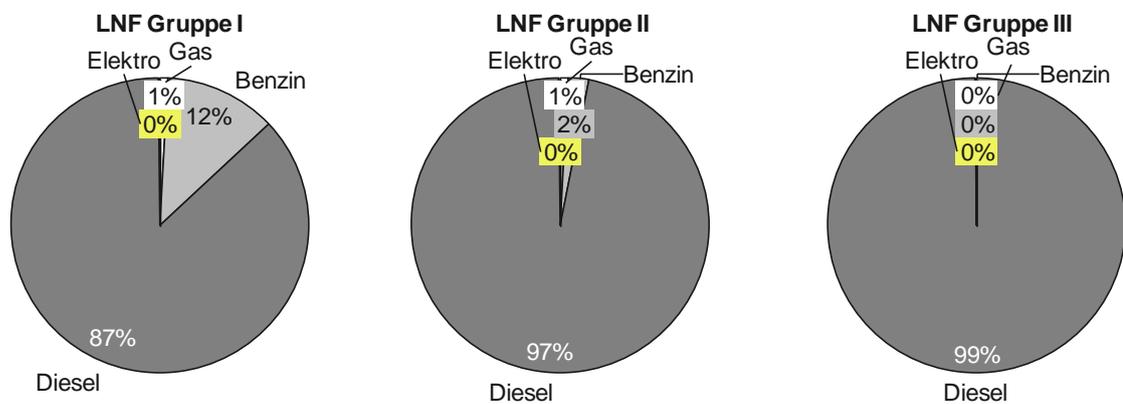


Abb. 4-28: Verteilung der Kraftstoffarten bei LNF 2011 [POL12]

Da noch kein offizielles Monitoring der spezifischen CO₂-Emissionen von LNF etabliert wurde, kann der tatsächliche Zielerreichungsstand im Jahr 2013 nicht auf Basis einer EEA Quelle angegeben werden. Für die weitere Untersuchung wurde der Status quo bei LNF durch eine Regressionsgerade auf Basis der empirischen Werte von 1,5 Mio. Neuzulassungen im Referenzjahr 2011 ermittelt. Daraus ergibt sich für ein durchschnittliches Neufahrzeug ein CO₂-Emissionswert von 187 g CO₂/km bei einer Durchschnittsmasse von 1.763 kg, vgl. Abb. 4-29 [ERN13].

Im EU-Flottendurchschnitt besteht damit noch eine Lücke von etwa 3 g CO₂/km bis zum Zielwert 2017 und 31 g CO₂/km bis zum Zielwert 2020. Da Fahrzeuge der Gruppe I mit Dieselmotor durchschnittlich 1.225 kg wiegen und 115 g CO₂/km ausstoßen, unterschreiten sie ihren massebezogenen Grenzwert bereits im Jahr 2011 um 35 g CO₂/km, ähnlich verhält es sich bei Dieselfahrzeugen der Gruppe II bei einem durchschnittlichen Masse von 1.476 kg. Entsprechende Fahrzeuge mit Ottomotor sind durchschnittlich etwas leichter und liegen im Referenzjahr 2011 noch leicht über ihrem spezifischen Grenzwert. Die hinsichtlich ihrer gesamten CO₂-Emissionen bedeutendste Gruppe III-Diesel liegen mit einem durchschnittlichen

CO₂-Ausstoß von 223 g/km noch etwa 20 g CO₂/km über ihrem spezifischen Grenzwert. Benzin-Fahrzeuge der LNF-Gruppe III und Gasfahrzeuge werden aufgrund ihres geringen Marktanteils nicht in der Darstellung berücksichtigt.

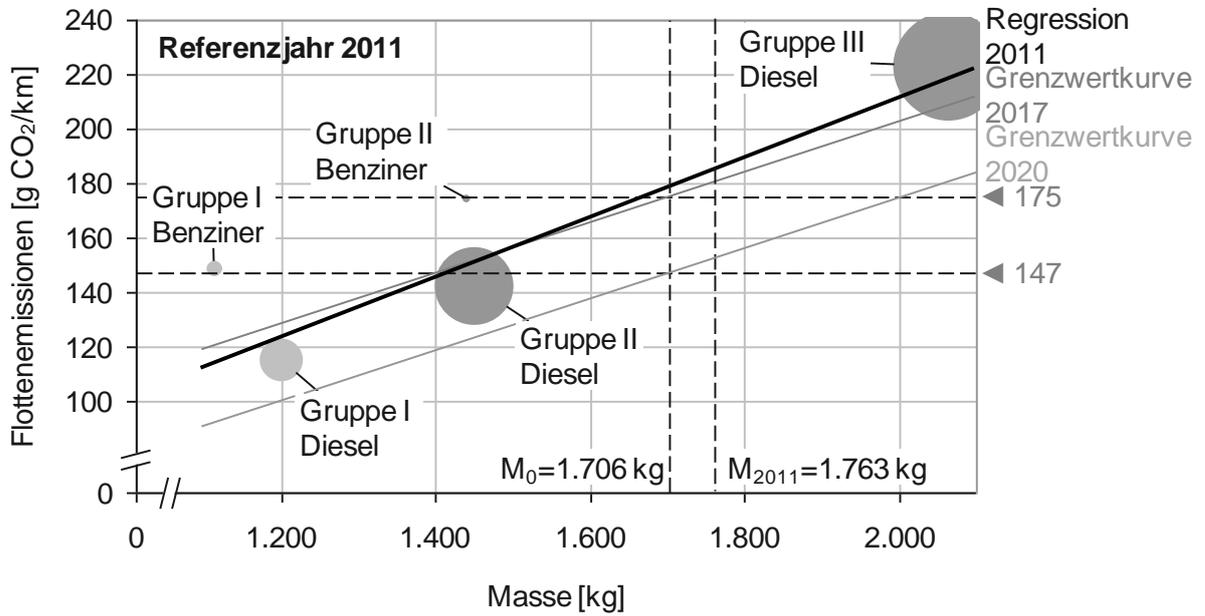


Abb. 4-29: Status quo der CO₂-Flottenemissionen bei LNF 2011 [POL12] [ERN13]

Bei einer Betrachtung auf Herstellerebene zeigt sich, dass bereits einige LNF-Hersteller die CO₂-Zielwertvorgaben für das Jahr 2017 erfüllen, vgl. Abb. 4-30.

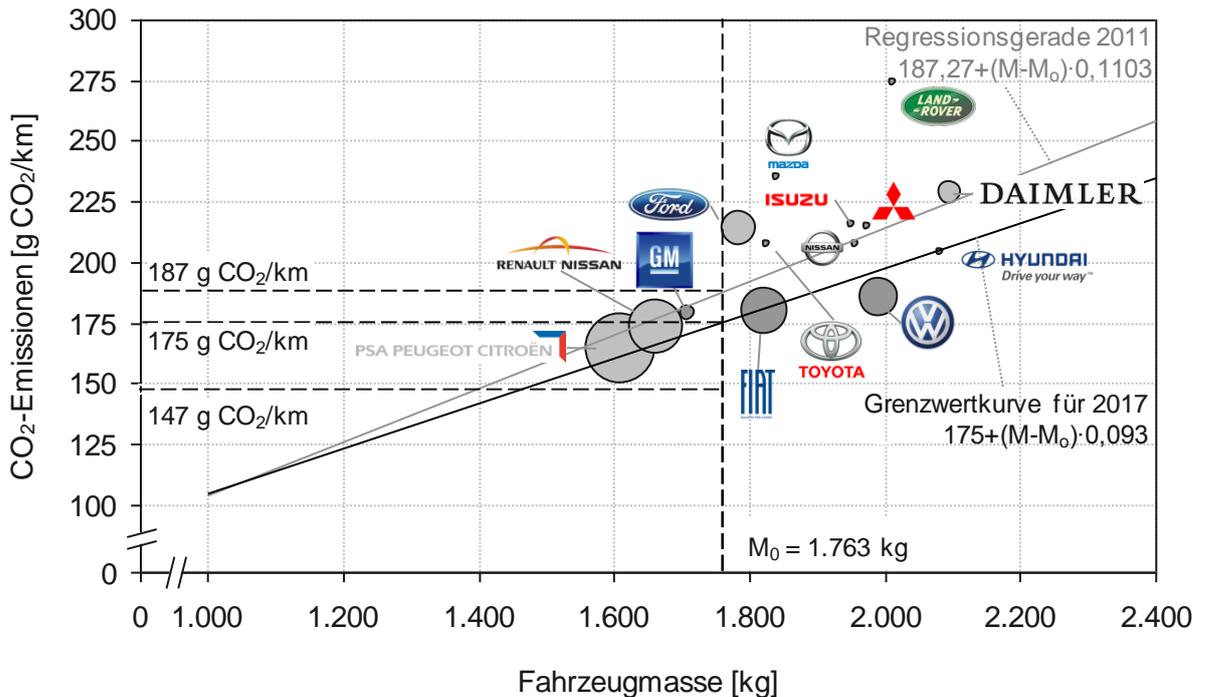


Abb. 4-30: Status quo der Flottenemissionen – LNF [ERN13] [POL12], Basisjahr 2011

Die Flotte von Volkswagen Nutzfahrzeuge liegt dabei unterhalb der gesamteuropäischen Regressionsgerade, emittiert also weniger CO₂ als ein durchschnittlicher Hersteller mit gleichem Flottendurchschnittsgewicht. Daimler und Ford hingegen liegen oberhalb der Regressionsgerade und weisen damit noch einen größeren Bedarf zur Reduktion der CO₂-Emissionen hinsichtlich der Grenzwerte für 2017 und 2020 auf. Da die Geradensteigung 2020 im Gegensatz zu Pkw identisch bleibt und nicht abflacht, ergeben sich keine direkten Verschiebungen der Minderungsanforderungen für Hersteller mit unterschiedlichem Flottendurchschnittsgewicht.

4.3 Zwischenfazit

Im Basisjahr 2010 bzw. 2011 der Untersuchungen beträgt die durchschnittliche CO₂-Flottenemission ca. 141 g CO₂/km bei Pkw bzw. ca. 187 g CO₂/km bei LNF. Von diesen Werten ausgehend stellen die massebasierten CO₂-Zielwertvorgaben für Pkw und LNF hohe Anforderungen an die absolute Minderung der CO₂-Flottenemissionen. Insbesondere bei Fahrzeugsegmenten mit hohem Durchschnittsgewicht bestehen höhere absolute und relative Anforderungen zur Erreichung zukünftiger CO₂-Grenzwertkurven. Während sich der durchschnittliche Zielwert bei Pkw von 130 g CO₂/km im Jahr 2015 auf 95 g CO₂/km bis Ende 2020 verringert, verschärft sich der Zielwert bei LNF von 175 g CO₂/km im Jahr 2017 auf 147 g CO₂/km im Jahr 2020. Im Hinblick auf die Weiterentwicklung der CO₂-Gesetzgebung hat die EU-Kommission erklärt, der Folgenabschätzung einen indikativen Zielkorridor von 68 – 78 g CO₂/km für Pkw im Jahr 2025 zugrunde legen zu wollen. Dies entspricht (in absoluten Größen) ungefähr einer linearen Weiterentwicklung des bisherigen legislativen CO₂-Minderungspfades.

Vorangegangene Analysen haben gezeigt, dass der 95 g CO₂/km Zielwert für das Jahr 2020/21 bereits eine große Herausforderung für die Fahrzeughersteller darstellt und nur unter günstigster Entwicklung der Rahmenbedingungen wirtschaftlich zu erreichen ist [ERN12]. Des Weiteren zeigte sich hierbei bereits, dass die Kosten zur Zielerreichung nicht linear, sondern exponentiell mit verschärften Zielwerten ansteigen. Vor diesem Hintergrund ist genauer zu analysieren, welche Zielwerte bis 2025 und 2030 technologisch und wirtschaftlich realisiert werden können und welche Rahmenbedingungen hierfür förderlich sind.

Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass in der EU auch unter Beachtung der spezifischen Flottenzusammensetzung vergleichsweise strenge Grenzwerte implementiert wurden. Die gegenwärtige Messung der CO₂-Emissionen in der EU beruht auf dem NEFZ, soll aber mittelfristig durch eine weltweit harmonisierte Prüfprozedur (WLTP) abgelöst werden. Obwohl durch ein dynamischeres Fahrprofil und einer strengeren Definition der entsprechenden Prüfbedingungen grundsätzlich mit höheren ausgewiesenen CO₂-Emissionen zu rechnen ist, sollen sich nach offizieller Verlautbarung durch die Verwendung von Umrechnungsfaktoren die CO₂-Zielwerte nicht indirekt verschärfen.

5 Technologische CO₂-Minderungspotenziale bis 2025 und 2030

In Kapitel 4 wurde dargelegt, dass zur Erreichung der bereits beschlossenen Flottenzielwerte bis 2020/2021 weitere Anstrengungen zur Entwicklung und Markteinführung CO₂-mindernder Technologien erforderlich sind. Gleichzeitig wird für den Zeitraum ab 2021 über eine weitere Verschärfung der CO₂-Gesetzgebung bei Pkw diskutiert. Auch im Bereich der LNF kann mit einer weiteren Verschärfung der CO₂-Grenzwerte gerechnet werden. Im Folgenden soll daher in einem ersten Schritt analysiert werden, welche CO₂-Minderungspotenziale bei Pkw und LNF bei einer rein technologischen Betrachtung im Zeitraum bis 2030 theoretisch machbar wären.

In Kapitel 5.1 wird zunächst in die Konzeption der im Rahmen dieser Studie durchgeführten szenarienbasierten Untersuchung eingeführt und die verwendeten Szenarien mit Blick auf die getroffenen Annahmen hinsichtlich der Entwicklung der Fahrzeugsegmente und Antriebsarten bei Pkw und LNF präzisiert. In Kapitel 5.2 wird anschließend in einer Technologieroadmap beschrieben, welche Technologien im Betrachtungszeitraum bis 2030 in den Massenmarkt vordringen und zur weiteren Reduktion der CO₂-Emissionen von neuen Pkw und LNF beitragen können. Anschließend wird in Kapitel 5.3 eine Konsolidierung der identifizierten Einzeltechnologien in Technologiepaketen vorgenommen, auf deren Basis schließlich in Kapitel 5.4 unter Berücksichtigung der zukünftigen Flottenzusammensetzung die im Betrachtungszeitraum minimal erreichbaren CO₂-Flottenemissionen abgeleitet werden.

5.1 Szenariendefinition

Die Weiterentwicklung der Datenbasis der Vorgängerstudien [ERN12] und [ERN13] bis zum Jahr 2030 erfolgt szenarienbasiert, da aus heutiger Sicht lediglich ein Intervall wahrscheinlicher und möglicher Entwicklungen identifiziert werden kann. Wesentliche exogene Faktoren, die Einfluss auf die weitere technologische Entwicklung, die Entwicklung der Fahrzeugmärkte und ihre zukünftige Struktur nehmen, werden im Folgenden zusammengefasst. Abgebildet werden die alternativen zukünftigen Entwicklungen und ihre Implikationen auf den Fahrzeugmärkten in drei, in sich konsistenten Szenarien.

Im **konservativen Szenario** wird davon ausgegangen, dass die Energiepreise (Kraftstoff und Strom) nur unterdurchschnittlich steigen werden. Hierdurch amortisieren sich für die Verbraucher die Investitionen in besonders verbrauchsgünstige Fahrzeuge erst nach längerer Zeit bzw. in Abhängigkeit von der Laufleistung. Aufgrund der tendenziell geringeren Nachfrage nach effizienteren Fahrzeugen entstehen für Automobilhersteller und deren Zulieferer nur vergleichsweise geringe Anreize zur Entwicklung und Markteinführung effizienterer/verbrauchsärmerer und CO₂-mindernder Technologien. Aufgrund der kleinen Stückzahlen, in der die entsprechenden Technologien gefertigt werden, ergeben sich keine oder nur geringe Lerneffekte und Kostensenkungspotenziale in der Produktion, weswegen diese Technologien für die Verbraucher weiterhin vergleichsweise teuer bleiben. Diese Entwicklung geht einher mit einem sehr zurückhaltenden Markthochlauf der Elektromobilität.

Im **Trendszenario** steigen die Energiepreise (Kraftstoff und Strom) entsprechend ihrer durchschnittlichen Steigerungsrate der vergangenen 10 Jahre weiter, woraufhin im Vergleich zum konservativen Szenario vermehrt in die Entwicklung und Markteinführung effizienterer/verbrauchsärmerer und CO₂-mindernder Technologien investiert wird. Mit steigenden Kraftstoffpreisen amortisieren sich diese für private und gewerbliche Kunden schneller, was über steigende Stückzahlen Lern- und Skaleneffekte in der Produktion hervorruft, die kostensenkend wirken. Aufgrund der höheren Kraftstoffpreise wird mit einem gesteigerten Markthochlauf der Elektromobilität gerechnet.

Im **progressiven Szenario** werden aufgrund eines überdurchschnittlichen Energiepreisanstiegs (Kraftstoff und Strom) die CO₂-Minderungspotenziale der Technologien stärker /maximal ausgereizt. Dies bedeutet zwar einen erhöhten Entwicklungsaufwand, welcher aber durch die deutlich höheren Stückzahlen von CO₂-Minderungstechnologien im Vergleich zum konservativen und Trendszenario kompensiert wird. Auch durch das wachsende ökologische Bewusstsein wird der starke Markthochlauf neuer Technologien forciert. Hierdurch liegen die Herstellkosten der Technologien bereits im Basisjahr 2020 unter jenen des konservativen- und des Trendszenarios. Über einen Feedback-Effekt wirkt sich dies auf eine nochmal gesteigerte Nachfrage nach diesen Technologien aus. Seitens der Fahrzeughersteller und Zulieferer wird verstärkt in die Entwicklung der Elektromobilität investiert, welche vom Kunden auch stark angenommen wird.

Im Folgenden werden die zentralen Parameter vorgestellt, eine vollständige Zusammenstellung aller im Rahmen der Szenariendefinition und Kundenmodellierung verwendeten quantitativen Annahmen befindet sich in Anhang I, vgl. Abb. 12-25 und Abb. 12-26.

5.1.1 Entwicklung der Fahrzeugsegmente

Für den Pkw-Bereich wird bis 2030 ein steigender Anteil des Kleinst- und Kleinwagensegments SEG-1 zu Lasten des bislang dominierenden SEG-2 angenommen, da sich hierfür sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite Anhaltspunkte finden lassen. Aus Sicht eines Herstellers kann eine Ausweitung des Kleinwagensegments attraktiv sein, wenn er hierdurch seine CO₂-Flottenzielwerte leichter erreichen kann. Dies zeigt sich z.B. im geringeren absoluten Abstand zur legislativen Grenzwertkurve von Kleinwagenherstellern im Vergleich zu Mittelklasse- oder Premiumherstellern. Diese Strategie dürfte zudem durch den Megatrend der Urbanisierung unterstützt werden, der ebenfalls kompaktere Fahrzeugmodelle begünstigt. Daher erscheint die Entwicklungsstrategie einiger Premiumhersteller plausibel, das Angebot an kleineren Fahrzeugmodellen zu erhöhen. Dies könnte zu der in Abb. 5-1 dargestellten antizipierten Entwicklung der Fahrzeugsegmente bis 2030 führen. Die Berechnungsergebnisse dieser Studie werden jedoch auch für eine gleichbleibende Marktverteilung (Segmentverteilung im Referenzjahr 2010) ausgewiesen, um den Einfluss der insbesondere durch die CO₂-Regulierung getriebenen Marktentwicklung gesondert bewerten zu können.

Bei LNF wird die nachgefragte Fahrzeuggruppe im Wesentlichen durch den Anwendungszweck bestimmt. Da sich die Einsatzanforderungen der Kunden, z.B. die benötigte Ladeflä-

che oder die maximale Zuladung, in Zukunft voraussichtlich nicht signifikant ändern werden, ist bis 2030 von einer konstant bleibenden Marktverteilung auszugehen. Auch künftig werden LNF der Gruppe III mit ca. 58 % den Hauptanteil der verkauften Fahrzeuge ausmachen. Für LNF der Gruppe II wird weiterhin ein Marktanteil von 32 %, für Fahrzeuge der Gruppe I von 11 % erwartet.

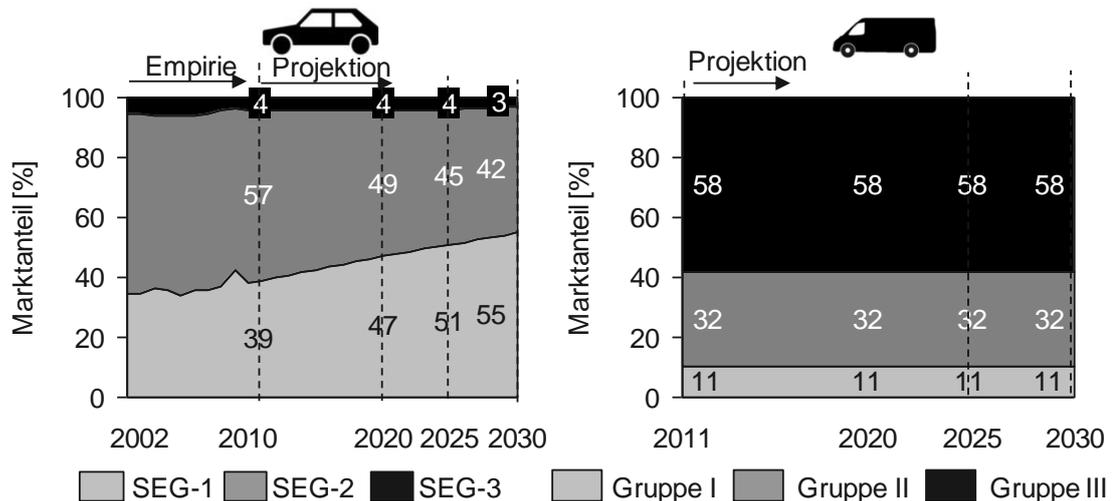


Abb. 5-1: Trend Marktverteilung Fahrzeugsegmente Pkw und LNF

5.1.2 Entwicklung der Antriebsarten

Die drei definierten Szenarien gehen von unterschiedlichen Entwicklungen der Kraftstoffpreise aus. Während im konservativen Szenario eine unterdurchschnittliche Steigerung der Energiekosten erwartet wird, steigen die Preise im Trendszenario durchschnittlich und im progressiven Szenario überdurchschnittlich an. Dadurch unterscheidet sich die zukünftige Marktverteilung der Kraftstoff- bzw. Antriebsarten zwischen den drei Szenarien. Sowohl für Pkw als auch für LNF werden im konservativen Szenario alle Marktanteile der Antriebsarten aus dem Basisjahr (2010 für Pkw) über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant gehalten.

Für Pkw wird im Trendszenario mit steigenden Marktanteilen der alternativen Antriebsarten gerechnet. Grundsätzlich ist von der Tendenz auszugehen, dass Fahrzeuge mit rein batterieelektrischem Antrieb vor allem im Kleinwagensegment SEG-1 realisiert werden. Der Grund hierfür liegt im überwiegend urbanen Einsatzbereich von Kleinwagen, welcher durch kurze Fahrstrecken charakterisiert ist und sich daher mit Elektrofahrzeugen leicht realisieren lässt.

Für das Jahr 2030 wird im Bereich der rein batterieelektrischen Fahrzeuge (BEV) je nach Segment ein Anteil von etwa 1 - 4 % angenommen, siehe Abb. 5-2. Das progressive Szenario geht von einem deutlichen Anstieg der BEV-Marktanteile in SEG-1 (6 %) und SEG-2 (4 %) aus. Darüber hinaus wird erwartet, dass LPG und CNG als Kraftstoffe nicht nur im Kleinwagensegment sondern auch in SEG-2 und SEG-3 bis 2030 Marktanteile von bis zu

8 % erhalten. Abb. 5-2 veranschaulicht die in den Betrachtungszeitpunkten 2025 und 2030 prognostizierten Marktverteilungen der Antriebsarten in den drei behandelten Szenarien.

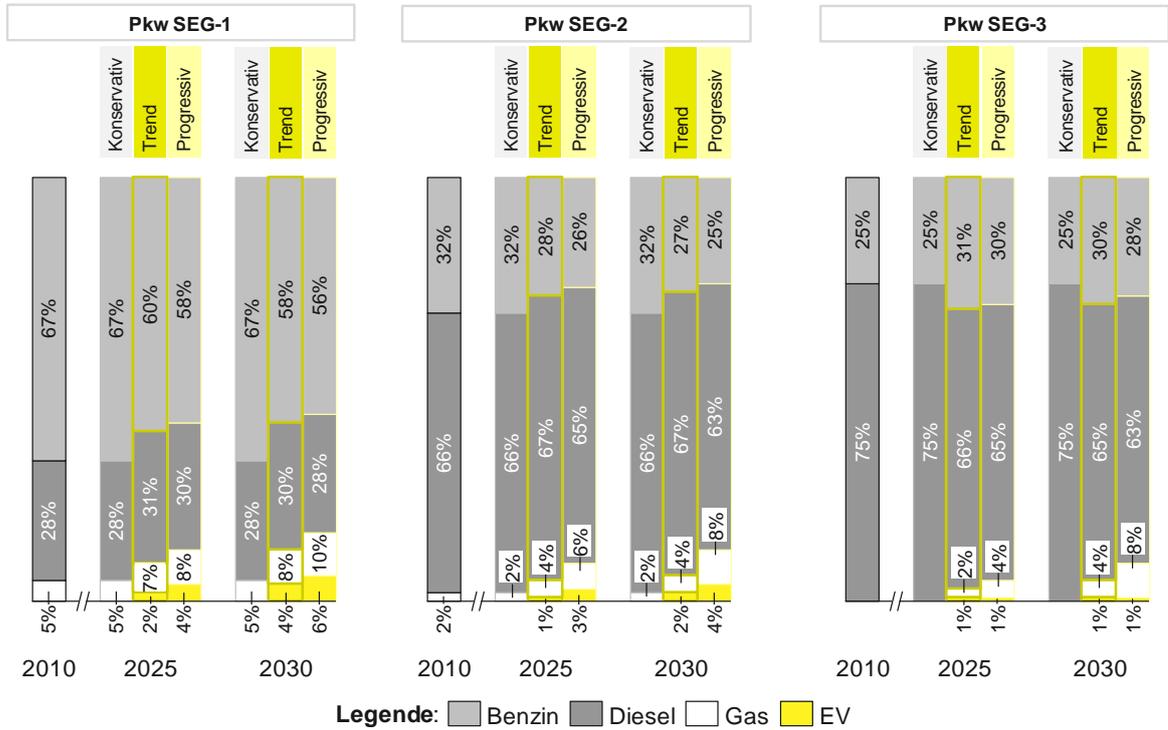


Abb. 5-2: Entwicklung der Marktverteilung der Pkw-Antriebsarten bis 2030

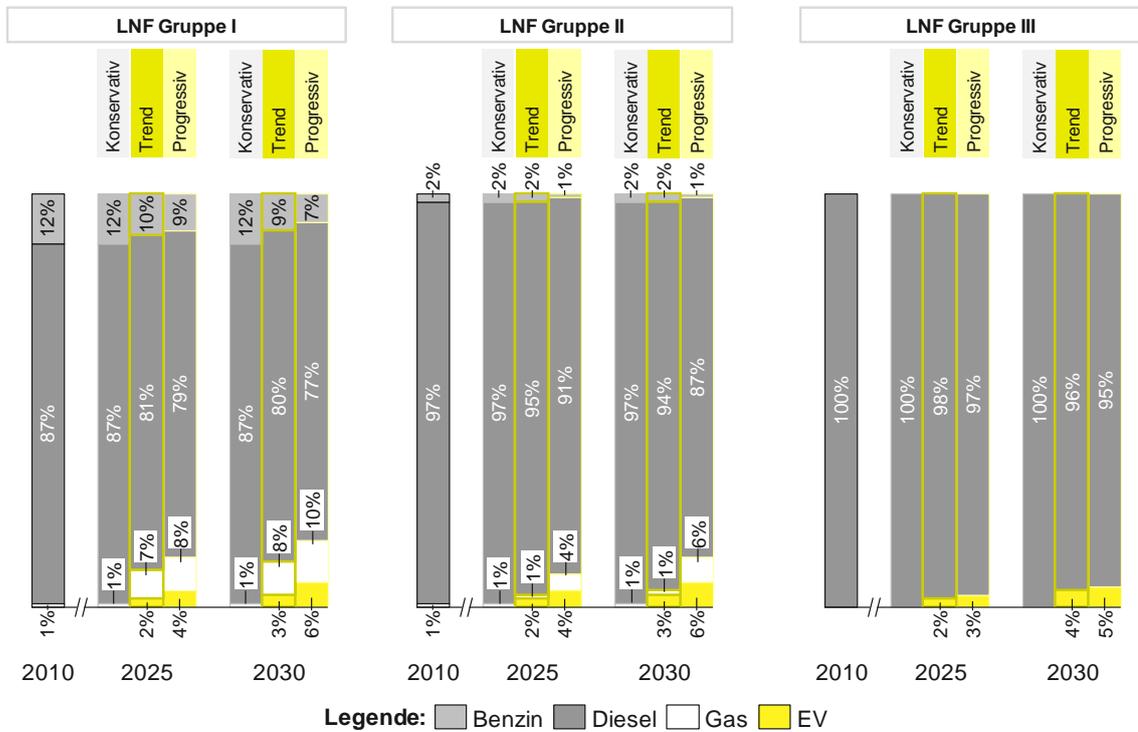


Abb. 5-3: Entwicklung der Marktverteilung der LNF-Antriebsarten bis 2030

Analog zu den Pkw wird für LNF im Trendszenario für das Jahr 2030 im Bereich der rein batterieelektrischen Fahrzeuge je nach Segment ein moderater Anteil von etwa 1 - 4 % angenommen, vgl. Abb. 5-3 . In Gruppe III (MB Sprinter, Ford Transit etc.) werden elektrifizierte Fahrzeuge für den lokalen Verteilerverkehr erwartet. Der Anteil des Gasantriebs erhöht sich in der Gruppe I analog zum entsprechenden Pkw SEG-1 deutlich auf 8 %. Das progressive Szenario geht zudem von einem deutlichen Anstieg der EV-Marktanteile auf 6 % aus.

5.1.3 Entwicklungs- und Produktionszyklen auf Fahrzeug- und Technologieebene

In den folgenden Unterkapiteln liegt der Analysefokus auf den aktuellen Entwicklungs- und Produktionszyklen der Automobilindustrie. Auf dieser Basis wird eine Empfehlung gegeben, zu welchem Zeitpunkt neue CO₂-Ziele mit einer Gültigkeit ab dem Jahr 2025 bzw. 2030 festgelegt werden sollten, dass Hersteller rechtzeitig strategische Entscheidungen zur Einführung neuer Technologien ins Kraftfahrzeug für ihre gesamte Produktpalette treffen können.

5.1.3.1 Entwicklungsprozesse

Fahrzeughersteller von Pkw und LNF steuern die Entwicklung neu einzuführender Fahrzeugmodelle oder –varianten anhand eines herstellereigenen aber vergleichbaren Fahrzeugentwicklungsprozesses. Letztlich regelt dieser auch die Zeitschiene der Festlegung strategischer Entscheidungen bzgl. neuer Fahrzeugderivate bzw. des Einsatzes neuer Technologien. Die Analyse der Entwicklungsprozesse für die Pkw bzw. LNF-Entwicklung lässt somit Rückschlüsse auf den kritischen Pfad für die Festlegung neuer legislativer CO₂-Ziele ab dem Jahr 2025 und 2030 zu, die aus Herstellersicht noch rechtzeitig bei der Einführung neuer Fahrzeugmodelle berücksichtigt werden können.

In der Regel verfügt jeder Hersteller über einen eigenen definierten Fahrzeugentwicklungsprozess, der sich in seiner zeitlichen Abfolge und Länge von anderen Herstellern unterscheiden kann. Dabei lassen sich jedoch einheitliche Phasen der Fahrzeugentwicklung voneinander abgrenzen. Grundsätzlich kann der Fahrzeugentwicklungsprozess in die Phasen der Produktplanung, Konzeptentwicklung, Serienentwicklung und Serienvorbereitung unterteilt werden, vgl. Abb. 5-4. In der parallel laufenden Vorentwicklung werden Technologien auf einen hinreichenden Reifegrad als Eingabe bzw. Innovation für die Konzeptentwicklung entwickelt.

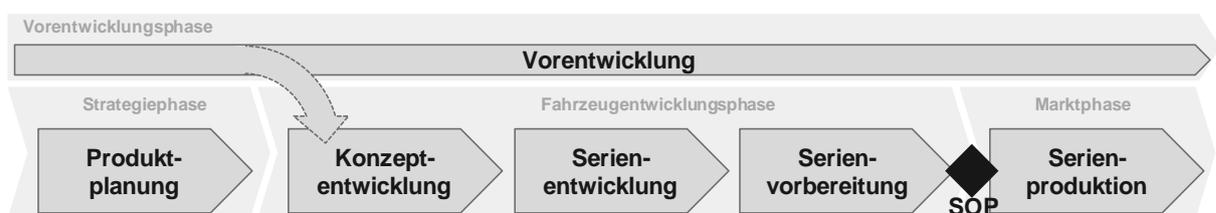


Abb. 5-4: Grundlegende Phasen eines OEM Fahrzeugentwicklungsprozesses

Serienentwicklung, Serienvorbereitung) ca. fünf Jahre. Prinzipiell ist davon auszugehen, dass LNF der Gruppe I eine Entwicklungszeit von ca. vier bis fünf Jahren aufweisen, ähnlich wie Pkw-Projekte, da sie häufig ein Derivat eines Pkw darstellen. Basierend auf dieser Dauer der Produktentwicklung wird das CO₂-Ziel eines Fahrzeugderivats entsprechend fünf Jahre bei größeren LNF bzw. vier Jahre bei kleineren LNF vor dem SOP in der Konzeptphase definiert, vgl. Abb. 5-6.

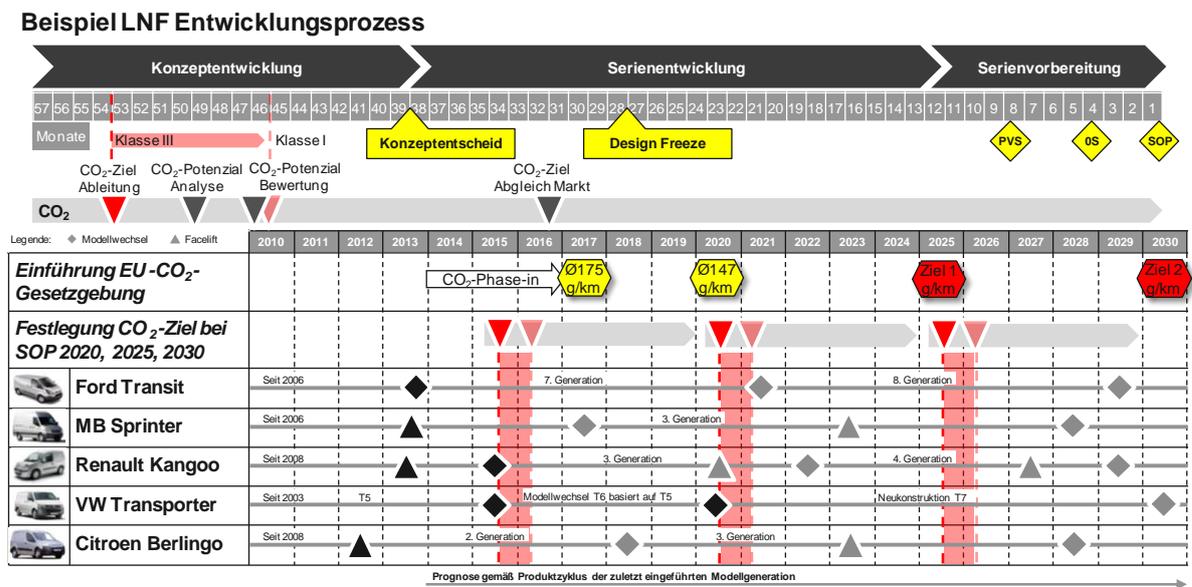


Abb. 5-6: Festlegung des CO₂-Zielwerts im Entwicklungsprozess bei LNF

Unter Berücksichtigung der strategischen Produktplanung benötigen Fahrzeughersteller nach Möglichkeit einen 8- bis 10-Jahreshorizont, um flexibel auf Änderungen in den gesetzlichen Rahmenbedingungen reagieren zu können. Folglich sollte die europäische CO₂-Gesetzgebung für 2025 bzw. 2030 frühzeitig vor den Jahren 2015 bzw. 2020 finalisiert werden, damit eine Anpassung der Produkt-Zykluspläne aus Herstellersicht noch gewährleistet werden kann.

5.1.3.2 Produktionszyklen und Plattformstrategien

Betrachtet man die historischen Produktionszyklen verschiedener Pkw-Fahrzeugmodelle, so ist ein Trend hin zu einer Verkürzung von Produktzyklen in der Pkw-Automobilindustrie erkennbar. Abb. 5-7 zeigt repräsentative Beispiele für verschiedene konsolidierte Fahrzeugsegmente bei Pkw.

Insbesondere bei Fahrzeugen im Mittelklasse-Segment, die das größte Marktvolumen in Europa besitzen, finden Produktwechsel in immer kürzer werdenden zeitlichen Abständen statt. Im SEG-3 dauert ein durchschnittlicher Produktionszyklus hingegen ca. sieben bis neun Jahre, wobei Produktaufwertungen i.d.R. nach drei bis vier Jahren eingeführt werden. Die Ursachen für eine zunehmende Verkürzung der Pkw-Produktionszyklen liegen vor allem in der zunehmenden Modell- und Variantenvielfalt, aufgrund von individuelleren Kundenanforde-

runger und steigendem Wettbewerb bei einer zunehmender Konzentration der Wettbewerber.

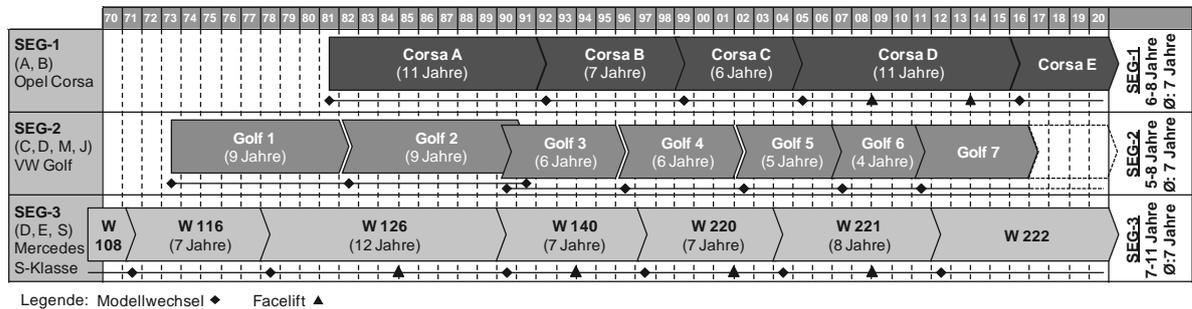


Abb. 5-7: Beispiele für die Verkürzung von Produktionszyklen bei ausgewählten Pkw [Datenbasis: Herstellerangaben]

Auch bei der Analyse historischer Produktionszyklen verschiedener LNF-Fahrzeugmodelle mit großem Marktvolumen in Europa (> 25.000 Neuzulassungen/Jahr) zeigt sich bei einigen Fahrzeugmodellen ein Trend zu verkürzten Produktionszyklen, der jedoch weniger stark ausgeprägt ist. Abb. 5-8 veranschaulicht die Produktionszyklen ausgewählter LNF für verschiedene LNF Gruppen.

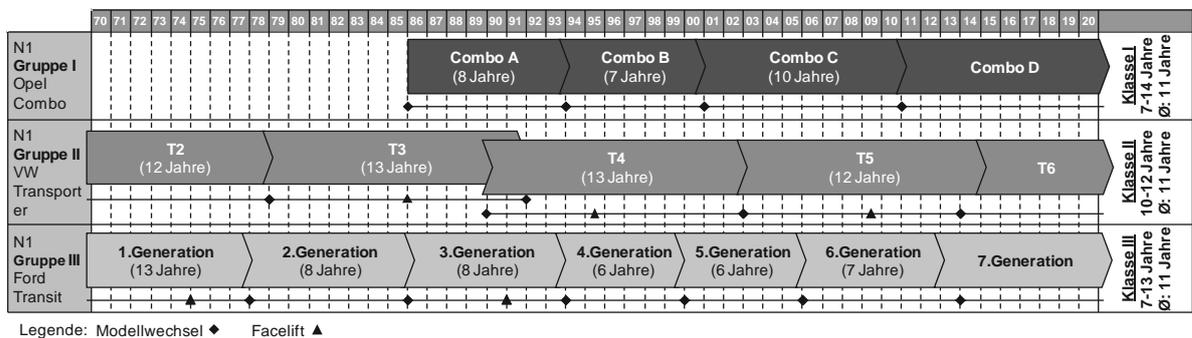


Abb. 5-8: Beispiele für Produktionszyklen ausgewählter LNF-Fahrzeugmodelle [Datenbasis: Herstellerangaben]

Im Durchschnitt liegt die Dauer des LNF-Produktionszyklus von zuletzt am Markt eingeführten LNF-Fahrzeugplattformen bei ca. elf Jahren. In der Regel durchläuft eine LNF-Fahrzeugmodellgeneration dabei mindestens einmal nach fünf bis sieben Jahren eine Produktaufwertung. Im Vergleich zu den Produktzyklen von Pkw weisen LNF somit einen wesentlich längeren Produktzyklus auf.

In den letzten Jahren haben Fahrzeughersteller von Pkw zunehmend die Entwicklungszeiten ihrer Fahrzeugmodelle reduziert, um eine zunehmende Modell- und Variantenvielfalt anzubieten. Damit sollen gestiegene Kundenanforderungen vor dem Hintergrund eines zunehmenden Wettbewerbs und einer zunehmenden Konzentration der Wettbewerber adressiert werden. Neben der verstärkten Einführung virtueller Methoden und Prototypen, die reale

Versuchsmethoden effizient ergänzen können, beeinflusst insbesondere die Nutzung modellübergreifender Fahrzeugplattformen die Entwicklungs- bzw. Einführungszeit neuer Modelle und Varianten.

Dabei kann das Teilen von Fahrzeugplattformen entweder innerhalb des Fahrzeugmodellportfolios einer Marke selbst oder im Rahmen von Kooperation mit anderen Herstellern erfolgen. Abb. 5-9 zeigt repräsentative Beispiele der Verwendung modellübergreifender Fahrzeugplattformen im Pkw-Bereich. Im Jahr 2012 führte Audi mit dem Modell A3 erstmalig ein Fahrzeugmodell basierend auf der neuen Produktionsplattform des VW Konzerns, dem „Modularen Querbaukasten“ (MQB) ein. Der MQB vereinheitlicht Technologieabmaße, wie den Abstand zwischen Fahrpedal und der vorderen Radmitte, mit variablen Parametern, wie dem Radstand oder den Spurbreiten, wodurch verschiedene Fahrzeuge auf einer Plattform realisiert werden können. Eine Übertragung solcher modularen Baukästen aus dem Pkw-Bereich auf LNF-Modelle erscheint dabei insbesondere bei Gruppe I Fahrzeugmodellen aufgrund ähnlicher Fahrzeugmaße wahrscheinlich, vgl. VW Caddy.

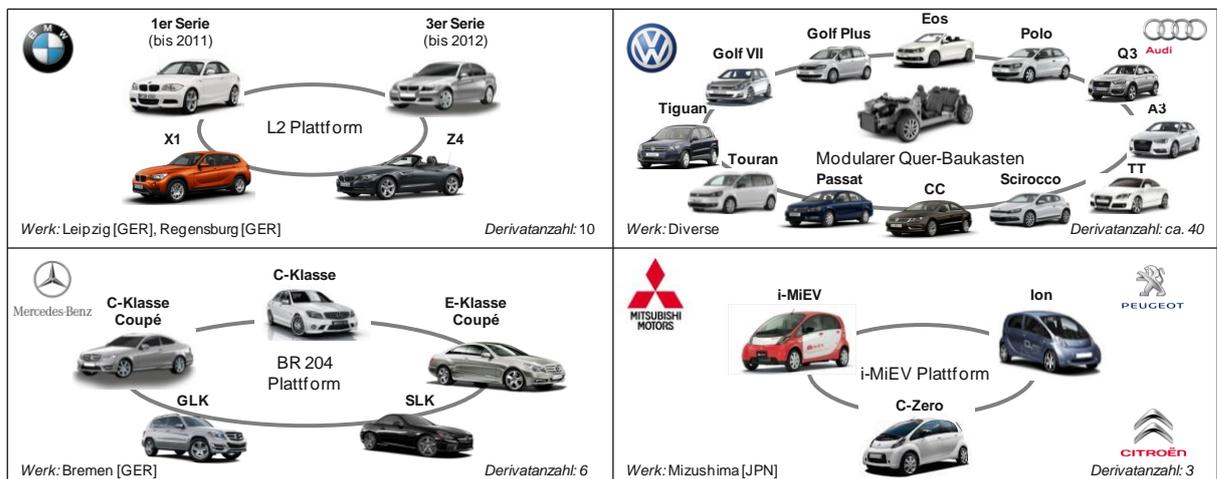


Abb. 5-9: Ausgewählte Beispiele modellübergreifender Pkw-Fahrzeugplattformen [Datenbasis: Herstellerangaben]

Grundsätzlich ist im Pkw-Bereich mit Ausnahme des SEG-1 die Verwendung herstellerübergreifender Fahrzeugplattformen über die Konzerngrenzen hinweg eher selten. Ein wesentlicher Grund hierfür stellt der starke Wettbewerb und die für den Kunden nach außen sichtbare Markendifferenzierung und Eigenständigkeit dar. Wesentlich ausgeprägter als bei Pkw ist die herstellerübergreifende Nutzung von Fahrzeugplattformen im LNF-Bereich. Ca. 52 % der 2011 in Europa zugelassenen LNF basierten auf insgesamt acht verschiedenen herstellerübergreifend verwendeten LNF-Fahrzeugplattformen. Abb. 5-10 gibt einen Überblick über die zugehörigen LNF-Fahrzeugmodelle und deren Marktanteil an Neuzulassungen in Europa im Jahr 2011. Fahrzeugmodelle, die eine herstellerübergreifende Plattform nutzen, weisen parallele Entwicklungszeiträume auf und verfügen folglich über einen nah beieinanderliegenden Produktionsstart (SOP). Entsprechend wirkt sich die Einführung neuer Technologien beim Modellwechsel auf alle zugehörigen Fahrzeugmodelle gleichzeitig aus.

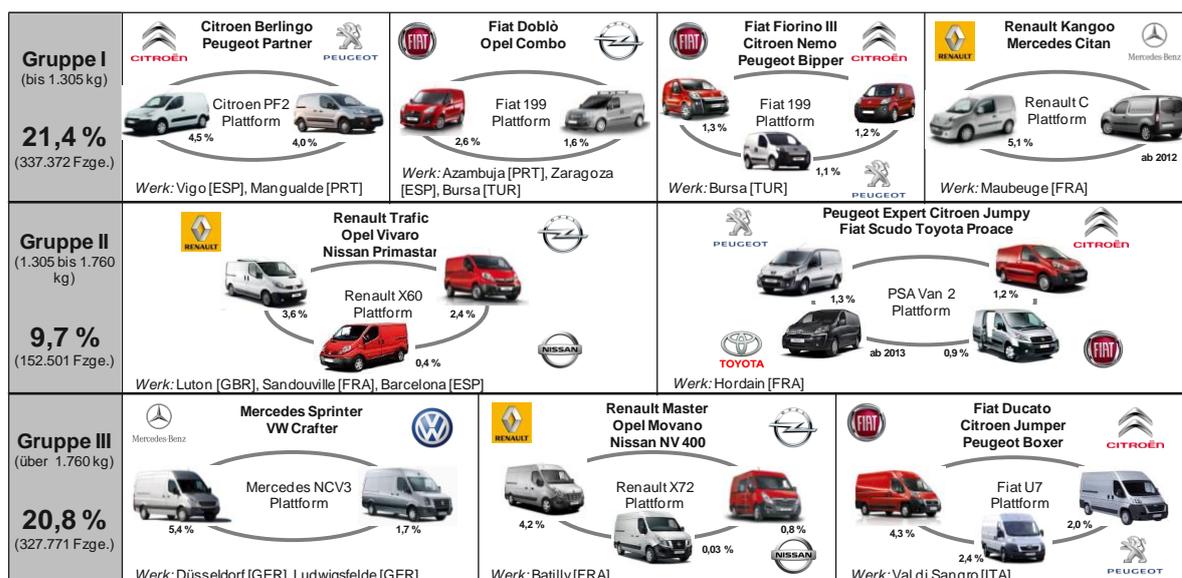


Abb. 5-10: Herstellerübergreifende Fahrzeugplattformen und Marktanteile bei LNF in Europa 2011 [Datenbasis: Herstellerangaben]

5.2 Technologien zur Reduzierung der CO₂-Emissionen

5.2.1 Referenzfahrzeuge

Um die künftigen technologischen Potenziale zur Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen von leichten Kraftfahrzeugen identifizieren und abschätzen zu können, ist zunächst der aktuelle Stand der Technik zu definieren. Da sowohl der Pkw-Markt als auch der LNF-Markt sehr heterogen sind, werden dazu in den jeweiligen konsolidierten Fahrzeugsegmenten Referenzfahrzeuge definiert. Auf Basis von Zulassungsdaten aus den Referenzjahren 2010 (Pkw) bzw. 2011 (LNF) wird analysiert, durch welche Kennwerte und Technologien typische Fahrzeuge der jeweiligen Gruppen und Segmente charakterisiert sind. Die Analyse erfolgt dabei getrennt nach Kraftstoff- bzw. Antriebsarten (Benzin, Diesel, Gas). Abb. 5-11 zeigt das Ergebnis dieser Auswertungen für Pkw.

Neben dem vermehrten Einsatz leistungsstärkerer, großvolumigerer Motoren bei höheren Segmenten ist zu beobachten, dass sich Automatikgetriebe im europäischen Markt bislang nur bei Fahrzeugen der Oberklasse durchgesetzt haben. Bei Fahrzeugen niedrigerer Klassen dominiert weiterhin das kostengünstigere handgeschaltete Getriebe. Während die Direkteinspritzung bei Dieseln aller Segmente bereits Standard ist, hat sie bei Benzinern bislang nur in höheren Segmenten größere Verbreitung gefunden. Gasbetriebene Fahrzeuge basieren aufgrund der Ähnlichkeit des Verbrennungsprozesses auf Benzinern des jeweiligen Segmentes.

Segment	Marktanteil 2010	Anteil im Seg.	Kraftstoff	Masse [kg]	Verbrauch [l/100km]	CO ₂ [g/km]	Hubraum [l]	Motor	DI	Getriebe	Leistung [kW]	Beispielfahrzeug
SEG-1 (A,B)	38 %	67 %	Benzin	1.067	5,4	127	1,2	4-Zyl.	-	Manuell, 5-Gang	60	Fiat Panda
		28 %	Diesel	1.194	4,1	111	1,4	4-Zyl.	x	Manuell, 5-Gang	60	
		5 %	Gas	1.112	6,1 _{LPG} / 100 km	106	1,2	4-Zyl.	-	Manuell, 5-Gang	60	
SEG-2 (C,D,M,J)	58 %	32 %	Benzin	1.396	6,8	159	1,6	4-Zyl.	-	Manuell, 6-Gang	90	Mercedes C-Klasse
		66 %	Diesel	1.573	5,4	145	2,0	4-Zyl.	x	Manuell, 6-Gang	90	
		2 %	Gas	1.331	7,9 _{LPG} / 100 km	137	1,6	4-Zyl.	-	Manuell, 6-Gang	90	
SEG-3 (E,F,S)	4 %	25 %	Benzin	1.635	9,1	213	2,8	6-Zyl.	x	Automatik, 6-Gang	170	BMW 5er/7er
		75 %	Diesel	1.795	6,1	164	3,0	6-Zyl.	x	Automatik, 6-Gang	170	
		< 0,5 %	Gas	1.853	10,1 _{LPG} / 100 km	177	2,8	6-Zyl.	x	Automatik, 6-Gang	170	

Abb. 5-11: Definition der Referenzfahrzeuge (2010) bei Pkw [EEA11]

Bei LNF überwiegen allgemein 4-Zylinder-Motoren und Handschaltgetriebe, wobei das Leistungsgewicht (Leistungs-Masse-Verhältnis) generell geringer ist als bei Pkw. Für die LNF Gruppe III mit Ottomotor und entsprechende Gasfahrzeuge werden dabei aufgrund des äußerst geringen Marktanteils von weniger als 0,1 % und der damit fehlenden Datenbasis keine Referenzfahrzeuge definiert, Abb. 5-12.

Segment	Marktanteil 2010	Anteil im Seg.	Kraftstoff	Masse [kg]	Verbrauch [l/100km]	CO ₂ [g/km]	Hubraum [l]	Motor	DI	Getriebe	Leistung [kW]	Beispielfahrzeug
N1 – Gruppe I	10,5 %	12 %	Benzin	1.140	6,3	149	1,4	4-Zyl.	-	Manuell, 5-Gang	55	Fiat Fiorino
		87 %	Diesel	1.225	4,3	115	1,4	4-Zyl.	x	Manuell, 5-Gang	55	
		1 %	Gas	1.250	7,3 _{LPG} / 100 km	128	1,4	4-Zyl.	x	Manuell, 5-Gang	55	
N1 – Gruppe II	31,5 %	2 %	Benzin	1.465	7,3	174	1,6	4-Zyl.	-	Manuell, 5-Gang	65	Peugeot Partner
		97 %	Diesel	1.476	5,4	142	1,6	4-Zyl.	x	Manuell, 5-Gang	65	
		1 %	Gas	1.550	9,2 _{LPG} / 100 km	160	1,6	4-Zyl.	x	Manuell, 5-Gang	65	
N1 – Gruppe III	58 %	100 %	Diesel	2.089	8,4	223	2,2	4-Zyl.	x	Manuell, 6-Gang	90	MB Sprinter

Abb. 5-12: Definition der Referenzfahrzeuge (2011) bei LNF [POL12]

5.2.2 Technologieroadmap

Die spezifischen CO₂-Emissionen der definierten Referenzfahrzeuge können durch die Anwendung verschiedener Technologien reduziert werden. Auf Basis der Referenzfahrzeuge

lässt sich wiederum das Potenzial der CO₂-Flottenemissionssenkung im Gesamtmarkt bestimmen.

Auf Basis der physikalischen Fahrwiderstandsgleichung ist herzuleiten, dass eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen entweder durch die Verbesserung der Effizienz der Energiewandlung oder durch die Reduzierung der Fahrwiderstände zu erreichen ist. Bereits für den Zeitraum bis 2020 wurden hierzu in der vorangegangenen IKA-Studie „CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020“ zahlreiche Technologien identifiziert [ERN12]:

- **Motor:** homogene Direkteinspritzung, Downsizing, variable Ventilsteuerung, Zylinderabschaltung
- **Elektrifizierung des Antriebstrangs:** Micro-, Mild-, Full- und Plug-in-Hybride
- **Getriebe:** Getriebeoptimierung / Downspeeding, CVT-Getriebe, Doppelkupplungsgetriebe, verbesserte Wandlergetriebe (7/8/9-Gang)
- **Übergreifende Maßnahmen:** Reibungsreduzierung im Antriebsstrang, Elektrifizierung von Nebenaggregaten, Thermomanagement
- **Fahrwiderstände:** Rollwiderstandsreduzierte Reifen, Aerodynamikmaßnahmen auf Design- und Komponentenebene, Leichtbau in Karosserie und Komponenten.

Darüber hinaus werden weitere Technologien erwartet, die im Zeitraum nach 2020 bis 2030 bei Pkw und LNF in Großserie in den Markt eindringen und die ein signifikantes Potenzial zur Senkung der CO₂-Flottenemissionen haben. Neben konventionellen Fahrzeugdomänen wie Antrieb und Karosserie werden dabei auch z.B. Fahrerassistenzsysteme, Car-to-Infrastruktur-Kommunikation, Eco Routing in die Untersuchungen mit eingeschlossen. Zwar kann das Potenzial jener Technologien nicht im NEFZ quantifiziert werden, jedoch haben sie das prinzipielle Potenzial, den CO₂-Ausstoß im realen Fahrbetrieb zu senken. Somit besteht für diese Technologien zum Teil die grundsätzliche Möglichkeit, als Ökoinnovation angerechnet zu werden. Abb. 5-13 fasst die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen.

Zur besseren Übersichtlichkeit sind in dieser Darstellung nur jene Technologien eingetragen, deren Anwendung bis 2030 tatsächlich als Großserie und „State-of-the-Art“-Technologie im jeweiligen Bereich erwartet werden kann. Ausgenommen sind hingegen einerseits jene Technologien, deren Markteintritt bis 2030 aufgrund untergeordneter Entwicklungsanstrengungen der OEMs und Zulieferer unwahrscheinlich erscheint. Andererseits sind Technologien, deren Markteintritt zwar realistisch erscheint, aber lediglich als „Nischentechnologien“ für spezielle Anwendungsfelder oder bei einzelnen Herstellern auftreten werden, hier nicht dargestellt.

Auch in Zukunft liegt der Entwicklungsfokus stark auf der Verbesserung der Effizienz des konventionellen Verbrennungsmotors. Dabei bieten sich für den Ottomotor mehr technologische Möglichkeiten als für den in den Referenzfahrzeugen bereits vergleichsweise effizienten Dieselmotor, dessen Entwicklungsfokus sich hin zur Verminderung des Schadstoffausstoßes (CO, NO_x, HC) fokussiert.

Die Entwicklung der Abgaswärmerückgewinnung, entweder im Rankine-Zyklus oder mit einem thermoelektrischen Generator (TEG), wird von Herstellern schon seit einigen Jahren vorangetrieben. Die Rückgewinnung per Rankine-Zyklus ist technologisch ausgereifter und wird deshalb bis 2025 erwartet, stellt aber weiterhin Herausforderungen an die Reduzierung von Bauraum und Masse. Erst später ist mit der Einführung des TEG zu rechnen, da bezüglich dieser Technologie zunächst eine wesentliche Verbesserung des derzeit erzielbaren Wirkungsgrades erreicht werden muss.

Fahrwiderstände können durch fortgeschrittenen Leichtbau weiter reduziert werden. Stellenweise finden dabei auch faserverstärkte Kunststoffe (FVK) Anwendung, welche aber weiterhin durch hohe Materialpreise und aufwändige Herstellungsprozesse relativ kostenintensiv sind.

Fahrerassistenzsysteme können den Kraftstoffverbrauch im realen Fahrbetrieb senken, nicht jedoch im NEFZ- oder WLTP-Prüfverfahren. Die Dauer bis zur Markteinführung der einzelnen Systeme korreliert mit deren Komplexität der Systeme und dem konstruktiven Aufwand an Fahrzeugen und Infrastruktur, die zu einem massenhaften Einsatz der Technologien notwendig sind. Während intelligentere Navigationslösungen mit vergleichsweise geringem Aufwand softwareseitig zu realisieren sind, erfordert die Car-to-Infrastructure-Kommunikation eine weitreichende Vernetzung. Ihre Einführung wird daher erst nach 2025 erwartet.



Abb. 5-13: Roadmap 2030 der stückzahlrelevanten Technologien

Die Quantifizierung der CO₂-Minderungspotenziale und verbundener Herstellkosten sowie der Gewichtseffekte wurde auf Basis vielfältiger externer und ika-interner Quellen vorgenommen. Als konsolidierte Studien wurden z.B. [TNO11], [TNO12], [RIC11], [RIC12], [MOC10], [EPA12] detailliert berücksichtigt. Die Technolgie-daten wurden mit aktuellen Beiträgen aus Fachzeitschriften, z.B. der Automobiltechnischen Zeitschrift ATZ und der Motor-

technischen Zeitschrift MTZ ergänzt und verifiziert. Ergänzend wurden interne und externe Expertenabschätzungen z.B. durch Telefoninterviews eingeholt. Im Rahmen eines Workshops mit Vertretern aus der Automobilindustrie sowie der Wissenschaft wurden die technologischen und wirtschaftlichen Prognosen präsentiert, zur Diskussion gestellt und konnten so abschließend bestätigt werden.

5.3 Technologiepaketbildung

Nach der Identifikation technologischer Potenziale und ihrer kostenseitigen Bewertung werden in einem weiteren Schritt Einzeltechnologien zu sogenannten „Technologiepaketen“ zur Reduktion der Komplexität zusammengefasst, vgl. [ERN12]. Ein Technologiepaket im Rahmen dieser Studie stellt ein in sich plausibles Bündel von Einzeltechnologien (z.B. variable Ventilsteuerung, Zylinderabschaltung) dar, die kombiniert auf die definierten Referenzfahrzeuge angewendet werden können und alternative Fahrzeugkonfigurationen repräsentieren. Die Technologiepakete sind jeweils durch unterschiedliche CO₂-Einsparpotenziale, Herstellkosten und Gewichtseffekte gekennzeichnet. Sie bilden die Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte hinsichtlich der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen oder der Ableitung von möglichen CO₂-Grenzwerten in folgenden Arbeitspunkten.

Zur Abbildung der zeitlichen Dynamik wird dabei explizit berücksichtigt, dass durch technologischen Fortschritt das CO₂-Reduktionspotenzial eines Technologiepaketes im Zeitverlauf ansteigt sowie durch Lern- und Skaleneffekte in der Produktion die Herstellkosten sinken, vgl. Abb. 5-14. Die entsprechende Fortschrittsintensität ist generell umso höher, je neuer das betrachtete Technologiepaket ist. Besonders hohe Lerneffekte sind bei Hybridtechnologien zu beobachten. Die Stärke der modellierten Lerneffekte und des technologischen Fortschritts variiert in den Szenarien, damit alternative zukünftige Entwicklungen abgebildet werden. Im progressiven Szenario wird von einer hohen Fortschrittsintensität ausgegangen, im konservativen Szenario wird die Entwicklung der CO₂-Flottenemission bei nur geringem technologischen Fortschritt analysiert.



Abb. 5-14: Alternative evolutionäre Entwicklungspfade einer Technologie

Damit das summarische CO₂-Reduktionspotenzial der Technologiepakete nicht überschätzt wird, wird durch einen spezifisch bestimmten Korrekturfaktor beschrieben, inwiefern sich aufgrund technischer Gegebenheiten die Potenziale einzelner Technologien verringern, wenn sie mit anderen kombiniert werden. Nach abgeschlossener Technologiepaket-Bildung liegen für jedes Fahrzeugsegment pro Szenario (Konservativ, Trend, Progressiv) sowie getrennt nach den Analysezeitpunkten 2025 und 2030 die folgenden Informationen vor:

- Zuordnung der Einzeltechnologien zu Technologiepaketen
- Relative und absolute Masseneffekte pro Fahrzeug unter Anwendung der Technologiepakete
- Resultierende absolute Masse je Fahrzeug
- Relative CO₂-Einsparung unter Anwendung der Technologiepakete je Fahrzeug
- Resultierenden absoluten CO₂-Emissionen je Fahrzeug
- Anwendung der Technologiepakete anfallenden zusätzlichen Herstellkosten pro Fzg.

Aufgrund der grundsätzlichen Unterschiede zwischen konventionellem und hybridisiertem Antriebsstrang wird dabei zwischen konventionellen Technologiepaketen („K“), hybriden Technologiepaketen („H“) und Technologiepaketen für PHEV bzw. REEV differenziert. Bis 2020 liegen zur Anwendung auf die einzelnen Fahrzeugsegmente die Technologiepakete TP1K, TP2K, TP3K, TP2H, TP3H, TP2PHEV/REEV, TP3PHEV/REEV mit in dieser Rangfolge steigenden Kosten und steigendem CO₂-Reduzierungspotenzial vor. Im Jahr 2025 wird dieses Portfolio jeweils um eine vierte Technologiepaketstufe ergänzt, 2030 um eine fünfte. Am Ende des Analysehorizonts stehen demnach insgesamt 13 alternative Technologiepakete je Segment zur Verfügung, wobei fünf durch einen konventionellen Antriebsstrang und vier durch einen hybridisierten Antriebsstrang und weitere vier als PHEV bzw. REEV ausgeführt sind. Abb. 5-15 zeigt zusammenfassend, welche Technologiepakete zu den einzelnen Zeitpunkten verfügbar sind.

Verfügbarkeit		Konventionell	Hybrid	PHEV/REEV	
Bis 2030	Bis 2025	Bis 2020	TP1	-	-
			TP2K	TP2H	TP2PHEV
			TP3K	TP3H	TP3PHEV
		TP4K	TP4H	TP4PHEV	
		TP5K	TP5H	TP5PHEV	

Abb. 5-15: Verfügbarkeit und Benennung der Technologiepakete bis 2025 und 2030

In Abb. 5-16 und Abb. 5-17 werden in CO₂-Masse-Diagrammen die Technologiepakete im Trendszenario von Pkw bzw. LNF dargestellt und der für 2020 avisierten Grenzwertkurve gegenübergestellt. Aus den Diagrammen ist zudem abzulesen, dass sich aus der Gewichtsreduktion der Fahrzeuge durch Leichtbaumaßnahmen aufgrund der massebezogenen Definition des individuellen Grenzwertes zugleich höhere Anforderungen an die CO₂-Reduzierung ergeben.

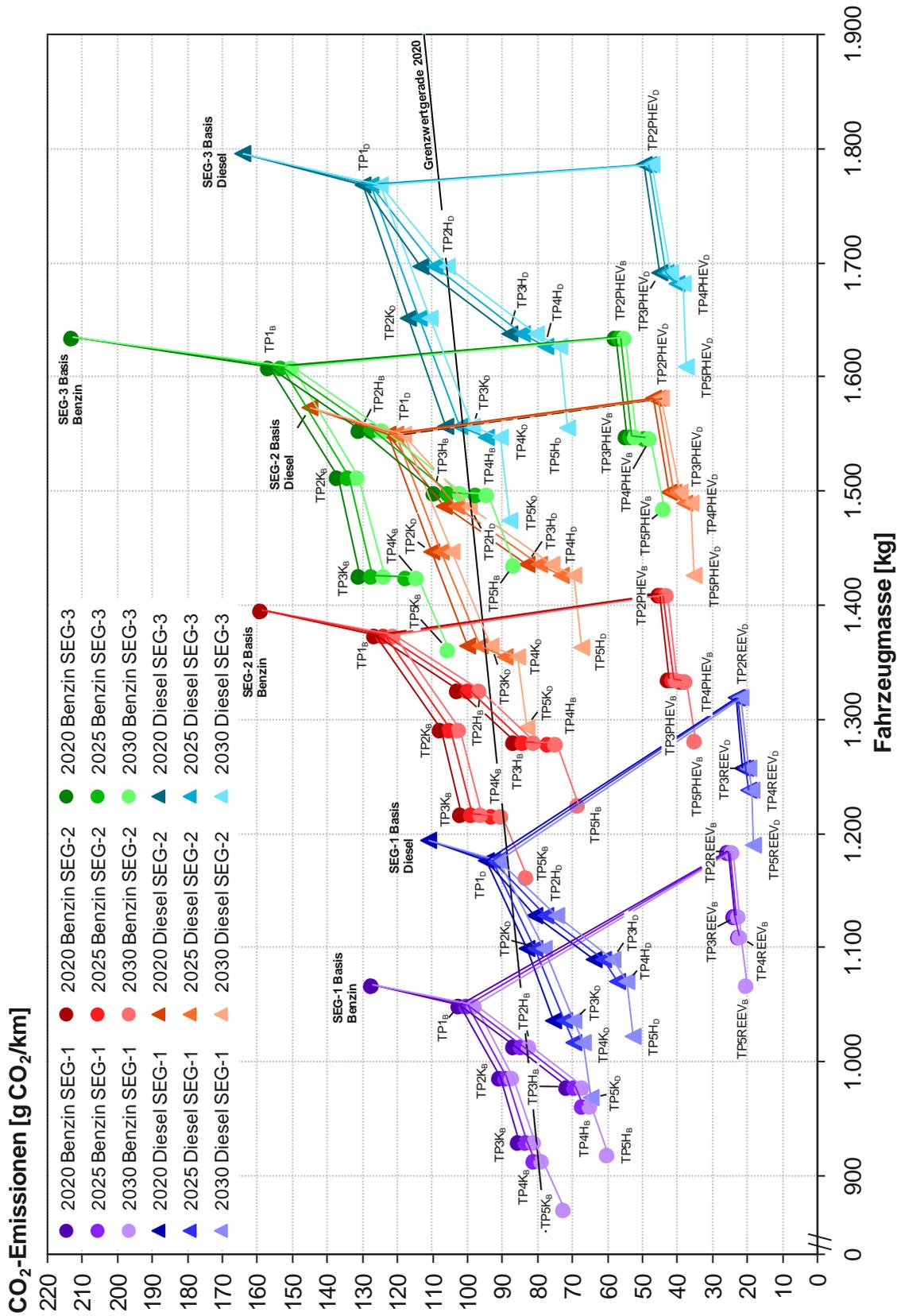


Abb. 5-16: Darstellung der Technologiepakete über der Fahrzeugmasse für Pkw, Trendszenario

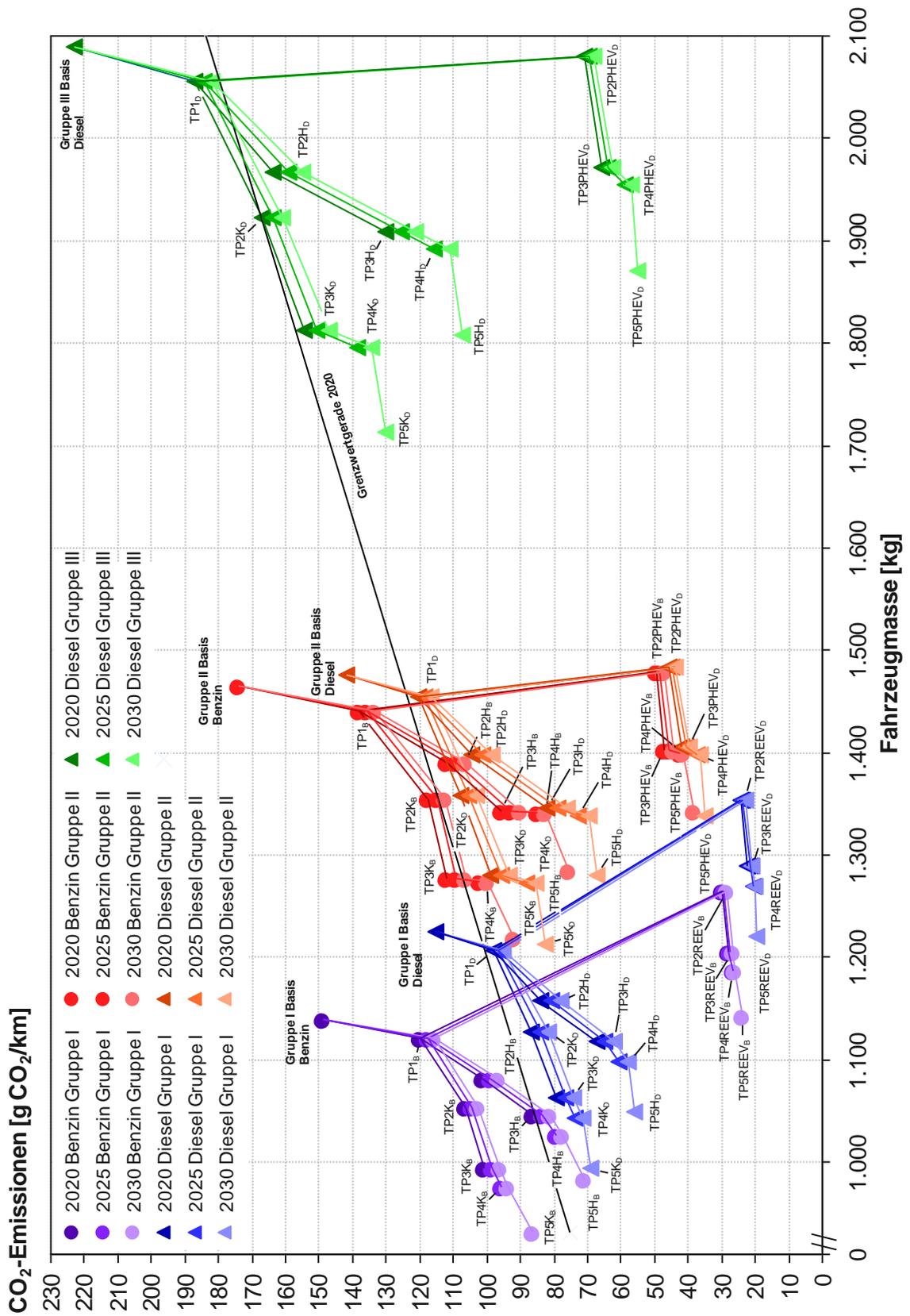


Abb. 5-17: Darstellung der Technologiepakete über der Fahrzeugmasse für LNF, Trendszenario

In Anhang II werden zudem die aus den identifizierten Einzeltechnologien zusammengestellten Technologiepakete tabellarisch beschrieben. So ist ersichtlich, welche Technologiepakete zu welchem Zeitpunkt bei welchem Fahrzeugsegment und welcher Antriebsart zur Verfügung stehen. Ebenso ist an jener Stelle die grafische Darstellung der Technologiepakete als Kosten-CO₂-Diagramme zu finden, in welchen insbesondere der Herstellkostenanstieg hin zu komplexeren Technologiepaketen deutlich wird, aber auch der evolutionäre Fortschritt.

5.4 Technologisch erreichbare CO₂-Flottenemissionen

Auf Basis der Technologiepaketbildung sowie der szenarienbasierten Projektion der zukünftigen Marktzusammensetzung werden für Pkw und LNF im Folgenden szenarienbasiert die unter rein technologischen Aspekten und damit nur theoretisch erreichbaren minimalen Flottenemissionen für die Jahre 2025 und 2030 ermittelt. Dabei handelt es sich um die bestenfalls möglichen Flottenemissionen, welche sich ergeben, indem jeweils die technologisch fortschrittlichsten konventionellen, hybriden und PHEV-Technologiepakete auf alle Referenzfahrzeuge angewandt werden und das Ergebnis auf die prognostizierte europäische Marktzusammensetzung projiziert wird. Damit kann das rein technologisch mögliche CO₂-Einsparpotenzial in der europäischen Fahrzeugflotte aufgezeigt werden.

5.4.1 Technologisch erreichbare Flottenemissionen bei Pkw

In Abb. 5-18 sind für die europäische Pkw-Flotte die bestenfalls erreichbaren Flottenemissionen für die Jahre 2025 und 2030 in Abhängigkeit der gewählten Technologiepakete mit den dabei anfallenden zusätzlichen durchschnittlichen Herstellkosten pro Fahrzeug dargestellt. Neben der Unterscheidung von konventionellen, hybriden und PHEV-Technologiepaketen werden in der Abbildung die Ergebnisse der Untersuchung in allen drei definierten Szenarien veranschaulicht.

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist der CO₂-Flottenemissionswert aus dem Referenzjahr 2010, in den Diagrammen jeweils am unteren rechten Rand dargestellt. Bereits ohne technologische Verbesserungen der Fahrzeuge ist eine Absenkung des Flottenemissionswertes bis zum Jahr 2025 bzw. 2030 zu erwarten. Der Grund dafür ist die in allen drei Szenarien prognostizierte Verschiebung der Marktanteile hin zu kleineren, leichteren und damit emissionsärmeren Fahrzeugen sowie eine Verbreitung alternativer Antriebsarten, vor allem batterieelektrischer Fahrzeuge. Im Jahr 2025 können bereits durch diesen Marktstruktureffekt die CO₂-Flottenemissionen je nach Szenario um bis zu 9 g CO₂/km und im Jahr 2030 um bis zu 14 g CO₂/km gegenüber dem Basisjahr 2010 sinken. Da bei der Betrachtung des Marktstruktureffekts keine technischen Veränderungen an den Fahrzeugen vorgenommen werden, fallen auch keine zusätzlichen Herstellkosten je Fahrzeug an.

Sollen die CO₂-Flottenemissionen über den Marktstruktureffekt hinaus gesenkt werden, ist die Anwendung von Technologiepaketen notwendig. Durch den flächendeckenden Einsatz konventioneller Technologien, d.h. ohne Elektrifizierung des Antriebsstranges, könnte der durchschnittliche Emissionswert der EU-Fahrzeugflotte in Abhängigkeit des betrachteten Szenarios theoretisch auf 86 g bis minimal 77 g CO₂/km (TP4K) im Jahr 2025 und auf 81 g

bis minimal 66 g CO₂/km (TP5K) im Jahr 2030 verringert werden, wobei zusätzliche Herstellkosten pro Fahrzeug (im Durchschnitt der EU-Fahrzeugflotte) zwischen 3.120 und 3.550 € (in 2025) bzw. zwischen 3.900 und 4.140 € (in 2030) zu erwarten wären. Eine weitergehende Reduzierung der CO₂-Emissionen wäre durch die Verwendung hybrider Technologiepakete möglich, durch welche sich je nach Szenario theoretisch ein Flottenemissionswert von 64 g bis minimal 72 g CO₂/km (TP4H) im Jahr 2025 und von 67 g bis minimal 54 g CO₂/km (TP5H) im Jahr 2030 ergeben würde; die zusätzlichen Herstellkosten pro Fahrzeug würden zwischen 4.370 € und 5.380 € (in 2025) bzw. zwischen 5.000 € und 5.760 € (in 2030) betragen.

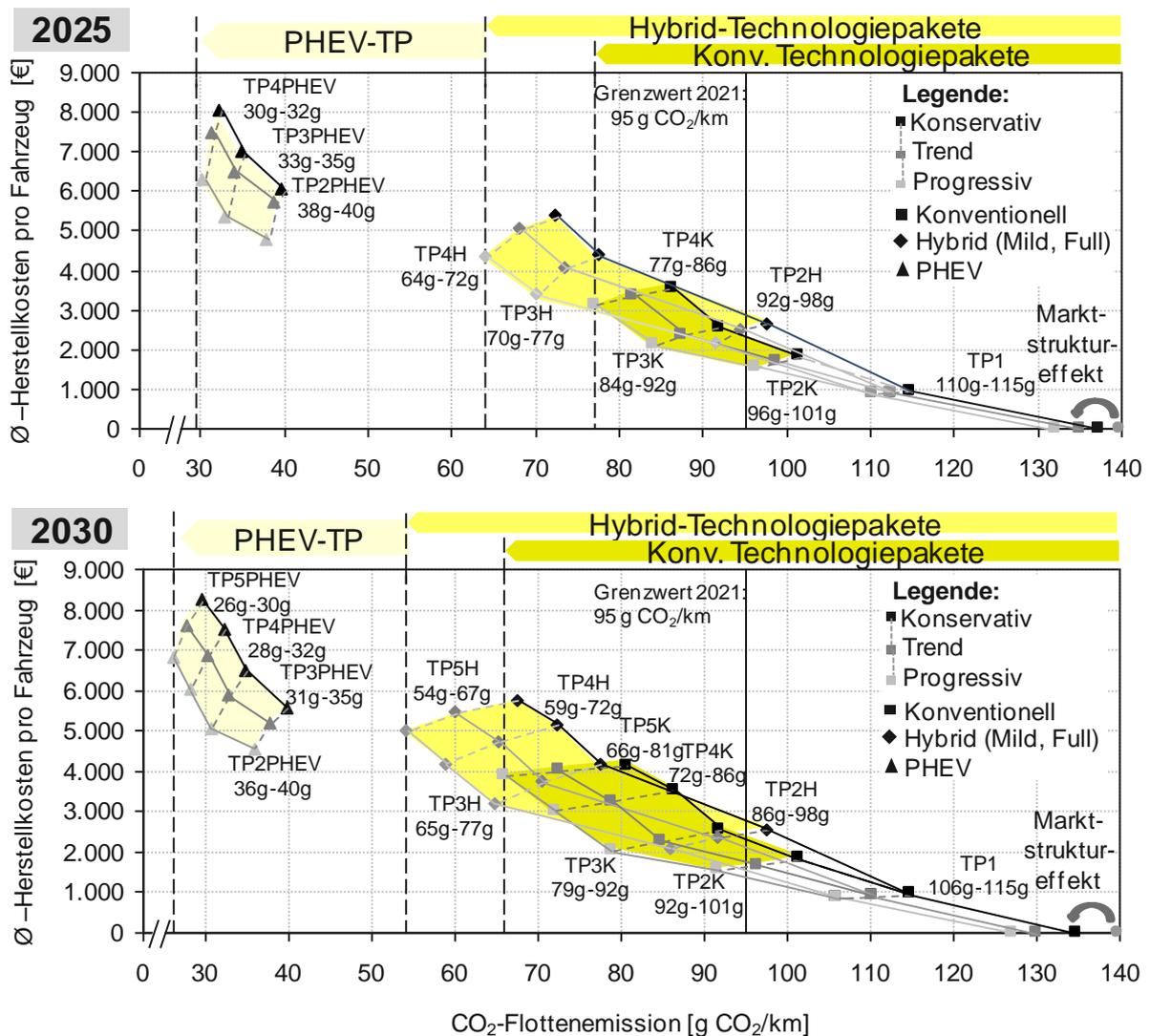


Abb. 5-18: Theoretisch erreichbare Flottenemissionen bei Pkw in den Jahren 2025 und 2030

Nochmals deutlich reduzierte CO₂-Emissionen würden sich schließlich durch den flächendeckenden Einsatz von PHEV-Technologiepakete ergeben, wobei hier die rein elektrische Reichweite der Fahrzeuge entscheidend für die erreichbaren Flottenemissionen sind. Im vor-

liegenden Fall mit rein elektrischen Reichweiten zwischen 40 km (SEG-2 und SEG-3) und 80 km (SEG-1) könnte der durchschnittliche Emissionswert der EU-Fahrzeugflotte je nach Szenario theoretisch auf 32 g bis minimal 30 g CO₂/km (TP4PHEV) im Jahr 2025 und auf 30 g bis minimal 26 g CO₂/km (TP5PHEV) im Jahr 2030 verringert werden; die zusätzlichen Herstellkosten pro Fahrzeug beliefen sich dann auf 6.300 € bis 8.070 € (in 2025) bzw. 6.800 € bis 8.240 € (in 2030).

Die genannten theoretisch möglichen Flottenemissionen ergeben sich dabei jeweils bei einer 100 %-Anwendung der Technologiepakete, d.h. alle Neufahrzeuge würden entsprechend ausgerüstet. Die große Bandbreite dieser theoretisch möglichen Flottenemissionen zeigt deutlich, welchen Einfluss die gewählten Annahmen und die erwartete Entwicklung der Rahmenbedingungen auf die abgeleiteten Ergebnisse haben.

Generell lässt sich feststellen, dass die Kosteneffizienz der einzelnen Minderungstechnologien zu den jeweils höheren TP-Stufen abnimmt. Dies bedeutet, dass die Herstellkosten für zusätzliche CO₂-Einsparungen bei fortgeschrittenen Technologiepaketen, z.B. TP4 und TP5, im Vergleich zu weniger fortgeschrittenen Maßnahmenbündeln, z.B. TP1 und TP2, überproportional ansteigen. Konventionelle, hybride und PHEV-Technologiepakete weisen innerhalb derselben TP-Stufe kaum Unterschiede bei der Kosteneffizienz auf. Als Beispiel lassen sich TP5K, TP5H und TP5PHEV aufführen, die jeweils durch eine ähnliche Kosteneffizienz gekennzeichnet sind.

Beim Vergleich der Diagramme der Zeitpunkte 2025 und 2030 ist bei Anwendung desselben Technologiepakets (z.B. TP4H im progressiven Szenario) eine Absenkung der CO₂-Flottenemissionen bei gleichzeitiger Reduktion der minimalen Kosten zwischen den Jahren 2025 und 2030 erkennbar. Im Jahr 2025 ließe sich durch 100 %-Anwendung von TP4H im progressiven Szenario ein Flottenemissionswert von 64 g CO₂/km zu zusätzlichen Herstellkosten in Höhe von 4.500 € erzielen, im Jahr 2030 wäre bei 100 %-Verwendung desselben Pakets ein Grenzwert von 59 g CO₂/km zu etwas niedrigeren Herstellkosten von etwa 4.100 € möglich. Die Gründe für diesen Effekt sind einerseits technologische Weiterentwicklungen, die zu einer größeren CO₂-Einsparung im Jahr 2030 im Vergleich zu 2025 führt, sowie der Produktions-Fortschritt, welcher eine Reduktion der Produktionskosten ermöglicht. Andererseits spielt auch an dieser Stelle der Marktstruktureffekt eine wesentliche Rolle, der die Verringerung der minimalen Flottenemissionen aufgrund veränderter Marktzusammensetzungen bei den Segmenten und Antriebsarten beschreibt.

5.4.2 Technologisch erreichbare Flottenemissionen bei LNF

Die am Beispiel der Pkw aufgeführten Effekte sind auf LNF übertragbar, für welche die unter rein technologischen Aspekten und damit nur theoretisch erreichbaren minimalen Flottenemissionen in den Jahren 2025 und 2030 in Abb. 5-19 dargestellt sind.

Im Vergleich zu Pkw liegt das Kostenniveau bei jeweils 100 %-Anwendung der Technologiepakete im Bereich der LNF etwas höher. Bei flächendeckender Anwendung des fortschrittlichsten konventionellen Technologiepakets (TP5K) könnten bei LNF je nach Szenario theo-

retisch Flottenemissionen von 120 g bis minimal 109 g CO₂/km im Jahr 2025 und von 116 g bis minimal 97 g CO₂/km im Jahr 2030 erreicht werden. Bei flächendeckendem Einsatz von hybriden Technologiepaketen wären theoretisch CO₂-Emissionen von 101 g bis minimal 90 g CO₂/km im Jahr 2025 und von 97 g bis minimal 78 g CO₂/km im Jahr 2030 möglich, bei PHEV-Technologiebündeln bei einer angenommenen rein elektrischen Reichweite von 80 km bei LNF Gruppe I sowie 40 km bei LNF Gruppe II und III würde dieser Wert auf 50 g bis minimal 46 g CO₂/km bzw. 48 g bis minimal 41 g CO₂/km sinken.

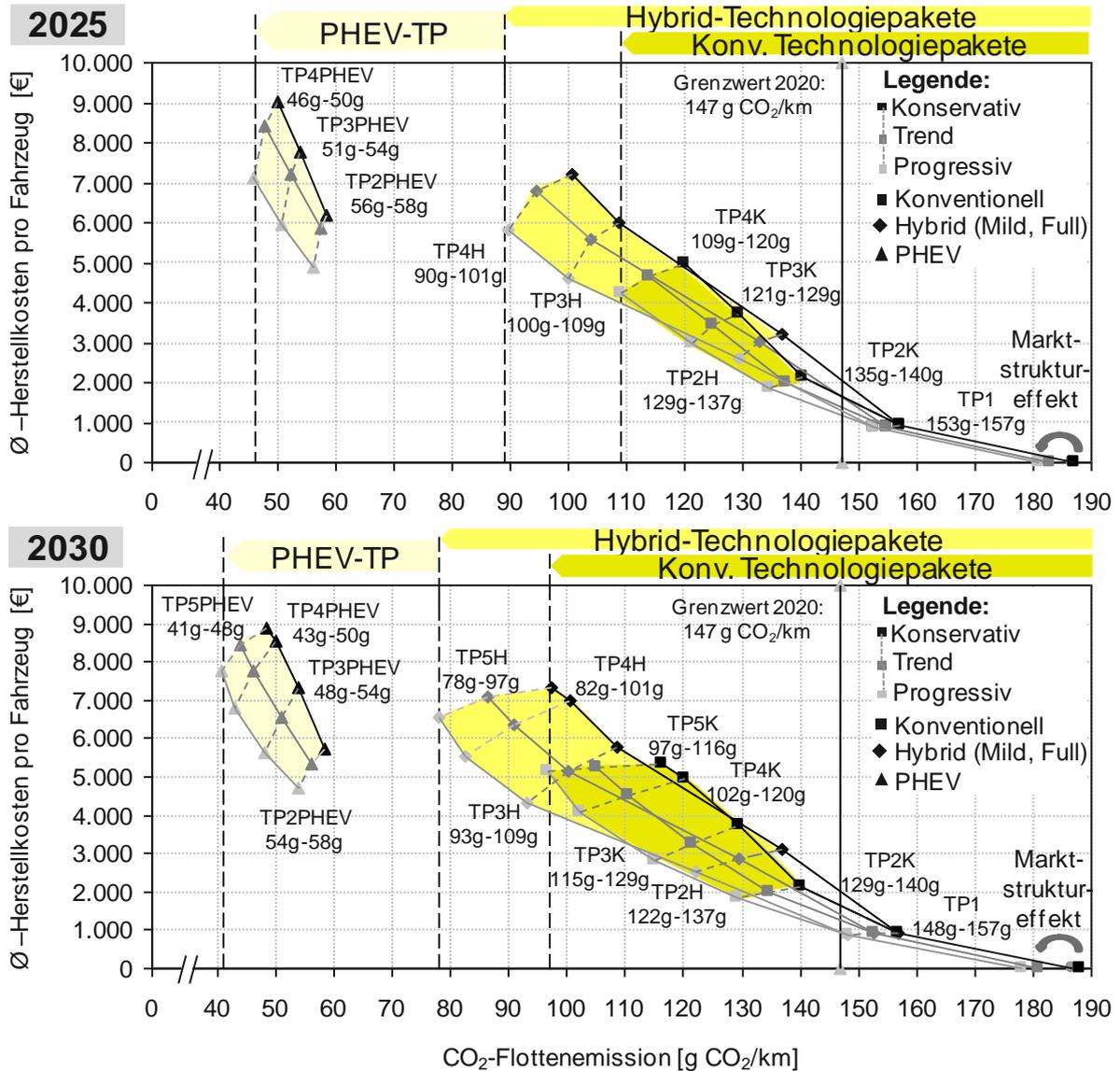


Abb. 5-19: Theoretisch erreichbare Flottenemissionen bei LNF in den Jahren 2025 und 2030

5.5 Zwischenfazit

Im Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2030 stehen weitere innovative Technologien im Massenmarkt zur Verfügung, welche für eine Erfüllung von verschärften Zielwertvorgaben

relevant werden können. Die größten Verbesserungspotenziale lassen sich generell bei Verbrennungsmotoren identifizieren, wobei der Ottomotor im Vergleich zum Dieselmotor größere Potenziale bietet. Gasfahrzeuge sind technologisch aufgrund des gemeinsamen Otto-Verbrennungsprozesses sehr nahe an Benzinfahrzeugen einzuordnen. Wesentliche technologische Verbesserungen nach dem Jahr 2020 werden ferner bei der Wärmerückgewinnung erwartet. Zudem ist eine Optimierung der Hybridtechnik zu erwarten, ohne dass jedoch gänzlich neue Konzepte in den Massenmarkt eindringen. Im Betrachtungszeitraum erlangen Plug-in-Hybride und Fahrzeuge mit Range-Extender zunehmende Bedeutung. Eine Reduzierung der Fahrwiderstände wird im Wesentlichen durch die Ausweitung der Leichtbaumaßnahmen auf Karosserie- und Komponentenebene erreicht.

Über den Markteintritt innovativer Technologien hinaus entwickeln sich existierende Technologien im Zeitverlauf evolutionär weiter. Fortschritte in der technologischen Weiterentwicklung verbessern das CO₂-Reduzierungspotenzial dieser Technologien, während Fortschritte im Produktions-Bereich zur Degression der Herstellkosten führen. In der darauf aufbauenden Generierung von Technologiepaketen werden die identifizierten Einzeltechnologien unter Berücksichtigung von Verfügbarkeitszeitpunkten, der Anwendbarkeit auf die einzelnen Fahrzeugsegmente und technologischer Wechselwirkungen zu kohärenten Maßnahmenbündeln zusammengefasst. Aus der Analyse der aufgestellten CO₂-Masse-Diagramme und Kostenkurven kann abgeleitet werden, dass sich unter Nutzung der fortschrittlichsten Technologiepakete die absoluten CO₂-Emissionen von Fahrzeugen mit Ottomotor jenen mit Dieselmotor weiter annähern.

Werden die Technologiepakete szenarienbasiert auf die jeweils projizierte Flottenentwicklung angewandt, können daraus technologisch theoretisch erreichbare CO₂-Flottenemissionen abgeleitet werden. So sind je nach Szenario auf Basis konventioneller Technologiepakete ohne Hybridisierung bei Pkw im Jahr 2025 CO₂-Flottenemissionen zwischen 77 g und 86 g CO₂/km theoretisch erreichbar. Wesentlich geringere CO₂-Flottenemissionen können nur unter Einsatz hybrider Technologiepakete mit erheblicher Steigerung der zusätzlichen Herstellkosten erzielt werden. Teile der CO₂-Emissionsreduktion sind dabei jedoch auf einen Marktstruktureffekt, bestehend aus einer Segmentverschiebung hin zu Kleinst- oder Kleinwagen oder eines vergrößerten Anteils von Gasfahrzeugen, ohne weitere technologische Maßnahmen zurückzuführen.

Durch die Markteinführung innovativer Minderungstechnologien wird die weitere Senkung der CO₂-Flottenemissionen nach dem Jahr 2020 potenziell technologisch ermöglicht, führt jedoch in Abhängigkeit des angestrebten CO₂-Flottenziels zu einem deutlichen Anstieg der durchschnittlichen Herstellkosten der Fahrzeuge, vgl. Abb. 5-20. Zur Ableitung der korrelierenden herstellkosten wird eine partielle Marktdurchdringung der jeweiligen Technologiepakete angenommen. Von den für 2025 diskutierten Zielwerten könnte nur der obere Zielwert von 78 g CO₂/km mittels konventioneller Technologiepakete und nur unter optimalen Rahmenbedingungen (progressives Szenario) bei zusätzlichen Herstellkosten von 3.000 € je Fahrzeug erreicht werden. Im Trendszenario würden die Herstellkosten je Fahrzeug zur Erreichung dieses Zielwertes um ca. 3.700 € steigen aufgrund der notwendigen Anwendung

hybrider Technologiepakete (Mild- oder Fullhybride) oder um ca. 3.200 € im Falle von PHEV-Technologiepaketen. Noch niedrigere Zielwerte könnten vielfach nur durch den Einsatz von PHEV-Technologiepaketen erreicht werden, was einen entsprechenden Anstieg der durchschnittlichen Herstellkosten der Fahrzeuge verursachen würde.

Durchschnittliche Herstellkostensteigerung je Fahrzeug [€]									
[€]	Konservativ			Trend			Progressiv		
Zielwert	Konv.	HEV	PHEV	Konv.	HEV	PHEV	Konv.	HEV	PHEV
78 g	x	4.300	3.500	x	3.700	3.200	3.000	2.900	2.600
	x	4.100	3.200	3.400	3.300	2.800	2.100	2.500	2.400
68 g	x	x	4.100	x	5.100	3.800	x	3.700	3.200
	x	5.700	3.800	x	4.200	3.400	3.600	3.000	2.900
60 g	x	x	4.700	x	x	4.300	x	x	3.600
	x	x	4.300	x	5.500	3.900	x	4.000	3.300
50 g	x	x	5.400	x	x	5.000	x	x	4.100
	x	x	4.900	x	x	4.500	x	x	3.800
Legende		Kosten 2025 Kosten 2030		x: Zielwert ist mit verfügbarerem TP nicht erreichbar <i>Partielle Marktdurchdringung aller TP (<100 %)</i>					

Abb. 5-20: Szenarienbasierte Ermittlung Herstellkostensteigerung zur CO₂-Zielwert-erreichung

6 Wirtschaftliche CO₂-Minderungspotenziale bis 2025 und 2030

Technologisch sind durch die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeugflotte die für das Jahr 2025 diskutierten CO₂-Zielwerte theoretisch zu erreichen, führen jedoch zu einem deutlichen Anstieg der durchschnittlichen Herstellkosten der Fahrzeuge. Hieraus ergibt sich die Fragestellung, inwiefern die Minderung der CO₂-Flottenemissionen auch aus Sicht der Fahrzeugkunden wirtschaftlich zu realisieren ist.

Im Folgenden sollen daher nun CO₂-Minderungspotenziale und Grenzwertkurven abgeleitet werden, die darüber hinaus aus Sicht der Fahrzeugkunden und der Hersteller als wirtschaftlich vertretbar angesehen werden können. Grundlegend für die nachfolgenden Berechnungen ist somit die Annahme, dass seitens des Gesetzgebers bis 2030 keine weitergehenden CO₂-Flottenzielwerte exogen festgesetzt werden und sich zusätzliche CO₂-Minderungen allein aus den individuellen Wirtschaftlichkeitskalkülen von Nachfragern und Anbietern von leichten Kraftfahrzeugen ergeben. Die in diesem Kapitel abgeleiteten CO₂-Flottenzielwerte und Grenzwertkurven stellen somit objektive Leitplanken für die Weiterentwicklung der CO₂-Regulierung nach 2020/21 dar.

6.1 Methodische Vorgehensweise

Das Ziel der folgenden Untersuchungen ist die szenariobasierte Berechnung der sich aufgrund von Marktmechanismen einstellenden CO₂-Flottenemissionen bei Pkw und LNF in den Jahren 2025 und 2030 und darauf aufbauend die Diskussion möglicher zukünftiger Grenzwertkurven.

Zunächst werden die wesentlichen Eingangsparameter für die marktbezogenen Wirtschaftlichkeitsberechnungen definiert. Diese umfassen zum einen die Energiepreisentwicklung (Kraftstoffe und Strom) bis 2030, zum anderen die Endkundenlistenpreise der bis 2025 und 2030 zur Verfügung stehenden Technologiepakete. Anschließend werden anhand wesentlicher Charakteristika einzelne Kundengruppen definiert und ihr primär an Wirtschaftlichkeitsaspekten orientiertes Entscheidungsverhalten im Hinblick auf den Kauf von neuen Fahrzeugen modelliert. Auf dieser Basis wird schließlich berechnet, welche Technologiepakete die einzelnen Kundengruppen in den verschiedenen Fahrzeugsegmenten (Pkw und LNF) erwerben und welche durchschnittlichen Flottenemissionen auf EU-Ebene sich dadurch in den einzelnen Szenarien im Markt einstellen würden. Die Berechnungen betreffen hierbei sowohl die erwartete Höhe der durchschnittlichen Flottenemissionen als auch den sich einstellenden regressiven Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und Fahrzeugmasse (Geradensteigung). Die Ergebnisse der Kundenentscheidungen werden schließlich alternativen zukünftigen Grenzwertkurven im relevanten Zielkorridor gegenübergestellt und daraus die aus Sicht der Kunden nicht rentierlichen Fahrzeugmehrkehrkosten berechnet, die bei der Erreichung bestimmter Emissionszielwerte entstehen würden. Diese Mehrkosten können die Hersteller im Regelfall nicht an die rein wirtschaftlich handelnden Kunden weitergeben. Die jeweiligen Berechnungen finden dabei sowohl auf der Ebene von Fahrzeugsegmenten als auch für

exemplarisch abstrahierte Fahrzeughersteller statt, welche jeweils durch einen spezifischen segmentweisen Schwerpunkt im Produktportfolio gekennzeichnet sind.

6.2 Eingangparameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die gewerblichen und privaten Fahrzeugendkunden entscheiden im Rahmen der gewählten Modellierung primär auf Basis wirtschaftlicher Parameter, ob sie die Investition in eine fortgeschrittene Technologie zur CO₂-Einsparung tätigen. Unabhängig vom konkret angewandten Entscheidungskalkül existieren dabei zwei zentrale Größen, die im Folgenden detaillierter betrachtet werden: Zum einen der Endkundenlistenpreis der Technologien bzw. der Technologiepakete und zum anderen die Entwicklung der Energiepreise als Determinante für das lauleistungsabhängige monetäre Einsparpotenzial durch den Einsatz der Technologiepakete.

6.2.1 Zusammensetzung der Endkundenlistenpreise

Durch den Einsatz einer fortschrittlichen kraftstoffsparenden Technologie bzw. einem entsprechenden Technologiepaket entstehen dem Fahrzeughersteller zusätzliche Kosten. Damit ein Fahrzeughersteller dauerhaft wirtschaftlich arbeiten kann, muss er seine Mehrkosten an den Kunden weitergeben, wodurch der Fahrzeugpreis im Vergleich zu jenem des Referenzfahrzeugs steigt. Dieser Anstieg des Fahrzeugneupreises fließt beim Fahrzeugkauf als zusätzliche aufzuwendende Summe in die Investitionsentscheidung des Endkunden ein. Im bisherigen Verlauf der Studie wurden Technologien lediglich hinsichtlich der bloßen zusätzlichen Herstellkosten (Materialkosten, Fertigungskosten und anteilige Entwicklungskosten) quantifiziert. Diese Herstellungskosten entsprechen jedoch nicht dem Marktpreis der entsprechenden Technologie, was durch eine differenzierte Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Herstellungskosten und Marktpreis erläutert werden soll.

Die Differenz zwischen den Herstellungskosten und dem Marktpreis einer Technologie ergibt sich aus den zusätzlichen Absicherungs-, Marketing- und Vertriebskosten (einschl. Händlermarge), Rückstellungen für Garantie, Rückrufe und Kulanz, der kalkulierten und langfristig notwendigen Marge des Fahrzeugherstellers und dem länderspezifischen Mehrwertsteuersatz, welcher in der EU durchschnittlich etwa 20 % beträgt [EUR13e]. Die Höhe der Margen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst und kann auch infolge strategischer Überlegungen des jeweiligen Herstellers im Zeitverlauf variieren. Langfristig kann jedoch kein Fahrzeughersteller dauerhaft unterdurchschnittliche Margen über seine gesamte Fahrzeugflotte hinnehmen. Aufgrund der hohen Sensibilität der Daten werden diese von den Fahrzeugherstellern in der Regel nicht veröffentlicht. Als Standardfall wird im weiteren Verlauf dieser Studie mit einem moderaten durchschnittlichen Aufschlag (engl. mark-up) von 40 % zzgl. der durchschnittlichen Mehrwertsteuer auf die Herstellkosten (insgesamt 60 %) gerechnet, vgl. [CUE99], [HOL04], [MCK12], [MOC10], der sich gemäß Abb. 6-1 zusammensetzt. Eine Variation des Eingangsparements Aufschlag bzw. Endkundenpreis findet im Rahmen der Sensitivitätsanalyse, vgl. Kap. 6.5.5.1, statt.

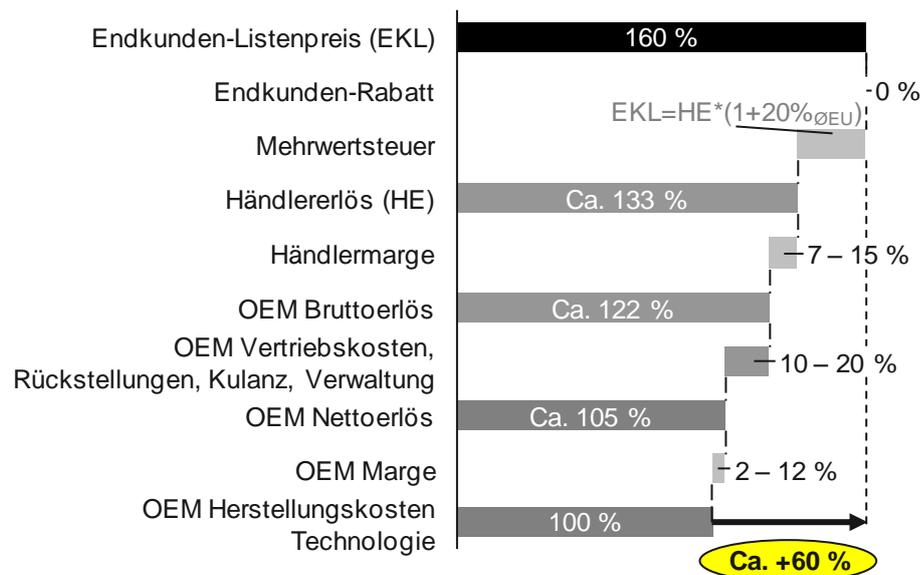


Abb. 6-1: Zusammensetzung des Endkunden-Listenpreises, in Anlehnung an [CUE99] [HOL04] [MCK12] [MOC10]

6.2.2 Energiepreisentwicklung

Kraftstoffkosten bilden bei konventionell betriebenen Fahrzeugen einen bedeutenden Anteil an den laufenden Betriebskosten. Die hier betrachteten Technologiepakete zielen darauf ab, den Kraftstoffverbrauch zu senken. Welche Kostenersparnis dadurch realisiert werden kann und wie attraktiv die Investition in das Technologiepaket mithin ist, wird wesentlich durch die künftige Entwicklung der Energiepreise (Kraftstoff und Strom) beeinflusst.

Die zukünftige Entwicklung der Kraftstoffpreise ist vielen Einflussfaktoren unterworfen, etwa der Angebots- und Nachfrageentwicklung, der Besteuerung, Wechselkursschwankungen sowie der politischen Lage in den erdölfördernden Staaten. Die Projektion der Kraftstoffpreise für die Jahre 2025 und 2030 erfolgt daher durch Integration in die drei Szenarien. Hierzu wird der empirische Trend anhand der Preiszeitreihen der vergangenen sieben Jahre ermittelt und für das Trendszenario in die Zukunft fortgeschrieben. Die Ausgestaltung der Szenarien erfolgt durch Erhöhung (progressives Szenario) bzw. Verringerung (konservatives Szenario) der jährlichen Preissteigerungsraten. Hieraus ergeben sich die in Abb. 6-2 gezeigten alternativen Kraftstoffpreisentwicklungen bis 2025 und 2030.

Für die künftige Marktdurchdringung von PHEV und rein batterieelektrischen Fahrzeugen spielt auch die Entwicklung des Strompreises eine entscheidende Rolle, denn sie beeinflusst die wirtschaftliche Attraktivität entsprechender Technologiepakete. Im Referenzjahr 2011 betrug der durchschnittliche Strompreis in der EU inklusive aller Steuern und Abgaben etwa 0,18 €, bei einer durchschnittlichen jährlichen Teuerungsrate im Zeitraum von 2007 bis 2011 von etwa 4,2 % [EST13b]. Im Hinblick auf den zumindest mittelfristig zu erwartenden Anstieg

des Endverbraucherstrompreises werden die Szenarien im Rahmen dieser Studie wie in Abb. 6-2 gezeigt ausgestaltet.

Energiepreise (Nominalpreise)		2025			2030		
	[Einheit]	Kons.	Trend	Prog.	Kons.	Trend	Prog.
Benzin (Super)	[€/ l]	2,12	3,09	3,90	2,41	3,80	5,09
	CAGR [%]	2,4	5,2	7,0	2,4	5,0	6,6
	Δ zu 2011 [%]	39	103	157	59	150	235
Diesel	[€/ l]	2,06	3,01	3,44	2,35	3,77	4,49
	CAGR [%]	2,8	5,6	6,6	2,8	5,4	6,3
	Δ zu 2011 [%]	47	115	146	68	169	221
Strom	[€/ kWh]	0,27	0,33	0,46	0,31	0,47	0,61
	CAGR [%]	2,9	4,4	6,9	2,9	5,2	6,6
	Δ zu 2011 [%]	8	32	84	24	88	144

Benzin₂₀₁₁: 1,52 €/l; CAGR₀₅₋₁₁: 4,1 %; Diesel₂₀₁₁: 1,40 €/l; CAGR₀₅₋₁₁: 6,4 %
Strom₂₀₁₁: 0,18 €/kWh; CAGR₀₇₋₁₁: 4,2 %

Abb. 6-2: Szenarien zur Energiepreisentwicklung (in Anlehnung an [EUR12a] [EST13b])

6.3 Kundengruppen und Kundenverhalten

Im Folgenden werden zur Ableitung von zukünftig erreichbaren Flottenemissionen für die Jahre 2025 und 2030 verschiedene Kundengruppen beschrieben und anschließend das jeweilige Entscheidungsverhalten am Markt modelliert.

6.3.1 Modellierung der Kundengruppen

Der Gesamtmarkt kann in gewerbliche und private Kunden unterteilt werden. Sie sind hinsichtlich ihrer jährlichen Fahrleistungen und ihres Investitionsentscheidungskalküls deutlich voneinander zu differenzieren.

Mit 49 % entfällt im Pkw-Markt knapp die Hälfte aller Neuzulassungen auf private Kunden, die übrigen 51 % auf gewerbliche Kunden [VDA07]. Während im Kleinwagen- und Mittelklassesegment etwa gleich viele Fahrzeuge an private und gewerbliche Kunden abgesetzt werden, ist im SEG-3 mit ca. 80 % ein spezifischer Schwerpunkt auf gewerbliche Zulassungen festzustellen [KBA12a]. Je nach Fahrzeugsegment und Kundengruppe liegt die jährliche Laufleistung der Fahrzeuge durchschnittlich zwischen 12.000 km und 30.000 km, wobei die Laufleistung bei gewerblichen Kunden bedeutend größer ist als bei privaten und zu höheren Fahrzeugsegmenten hin ansteigt. Dieselfahrzeuge legen jährlich größere Laufleistungen zurück als Benziner des gleichen Segments [MID10]. Das Fahrprofil wird als zeitlich konstant angenommen und ist in allen Szenarien gleich. Die segmentspezifischen Verteilungen der

Kundengruppen und die Laufleistungen für Pkw-Kunden ist in Abb. 6-3 graphisch wiedergegeben.

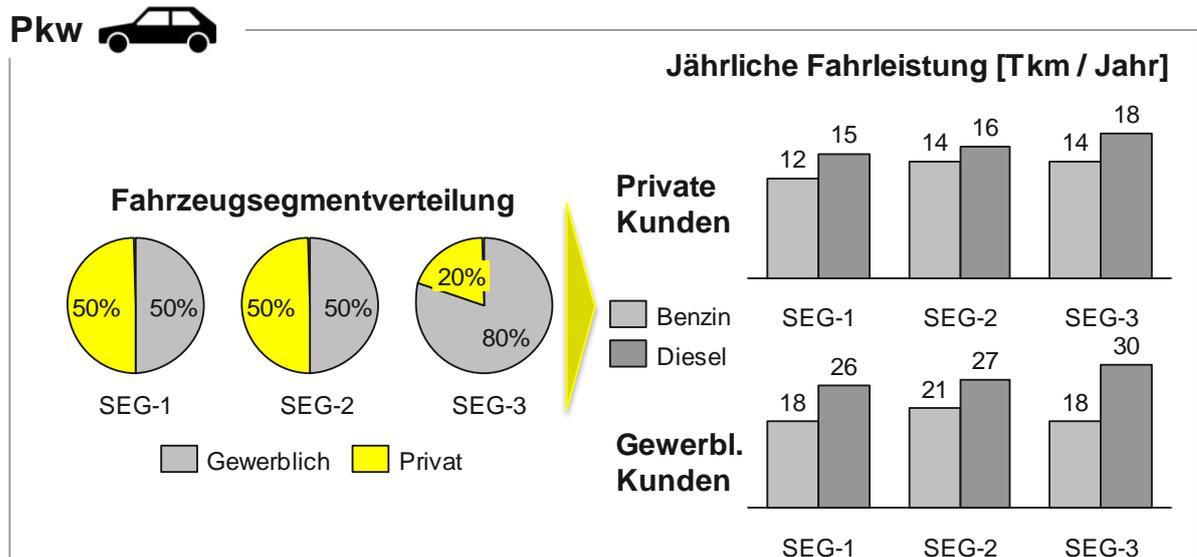


Abb. 6-3: Kennzahlen zur Modellierung der Pkw-Kunden [KBA12a] [MID10] [VDA04] [VDA07] [WVI12]

Annähernd alle LNF werden durch gewerbliche Kunden zugelassen, weshalb ihr Anteil im Folgenden mit 100 % angenommen wird. Die durchschnittliche jährliche Laufleistung bei LNF liegt zwischen 11.000 km und 18.000 km und steigt zu schwereren LNF-Gruppen hin leicht an. Fahrzeuge mit Dieselmotor legen im Durchschnitt deutlich größere Laufleistungen zurück als entsprechende LNF mit Ottomotor [VDA04] [WVI12]. Die Modellierung der LNF-Kundengruppen ist in Abb. 6-4 zusammengefasst.

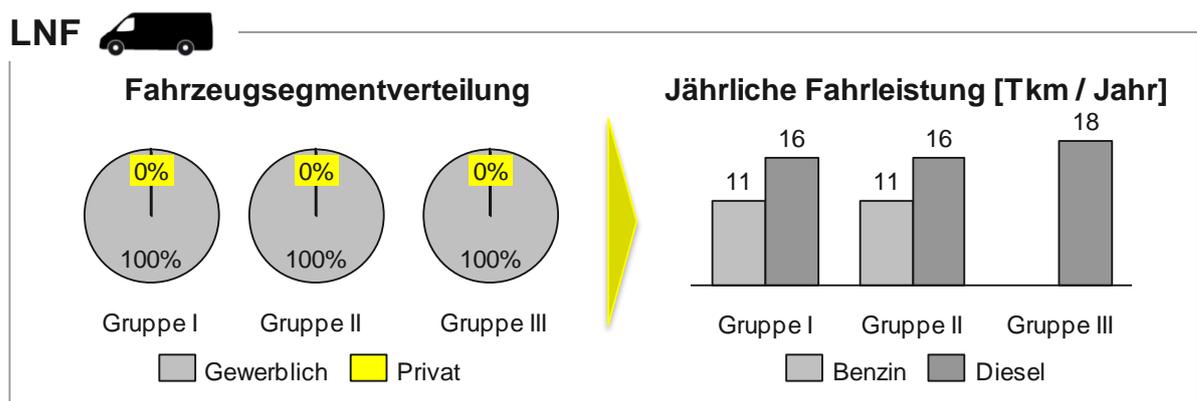


Abb. 6-4: Kennzahlen zur Modellierung der LNF-Kunden [VDA04] [WVI12]

6.3.2 Modellierung des Kundenverhaltens

Bei der Investition in kraftstoffsparende Technologiepakete stehen einer Ausgabe zum Zeitpunkt des Fahrzeugkaufs generell zukünftig realisierbare Kosteneinsparungen durch eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs gegenüber. Auf Basis der Zahlungsströme wägen die Endkunden ab, ob sie ein bestimmtes Technologiepaket wählen.

Aufgrund des weit in die Zukunft reichenden Betrachtungszeitraums wird in dieser Studie das vereinfachte Verfahren der statischen Amortisationsrechnung zur Modellierung der Kundenentscheidungen verwendet. Dabei wird berechnet, ob sich die Investition in ein Technologiepaket innerhalb eines Betrachtungszeitraums durch die jährlichen Kraftstoffeinsparungen amortisiert. Bei der statischen Amortisationsrechnung wird keine Diskontierung der Einsparungen vorgenommen und stets die Kraftstoff- und Strompreise des Investitionszeitpunkts herangezogen, vgl. Abb. 6-5. Bei mehreren Investitionsalternativen entscheiden sich die Endkunden für diejenige mit dem größten Überschussbetrag im Betrachtungszeitraum. Der Vorteil der statischen Amortisationsrechnung besteht darin, dass diese Berechnungsart im Regelfall auch von privaten Endkunden durchgeführt werden kann und wird. Somit sind keine, insbesondere bei sehr langen Zeithorizonten mit starken Unsicherheiten belegten, kontinuierlichen Preisreihen notwendig sind.

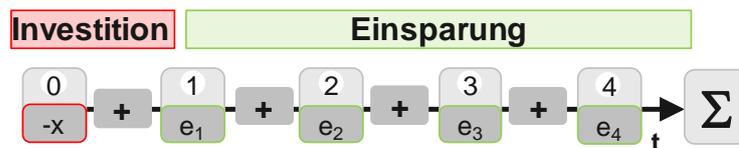


Abb. 6-5: Statische Amortisationsrechnung

Die durchschnittliche Fahrzeughaltedauer bei privaten Käufern beträgt etwa 5,6 Jahre [STE12]. Da Fahrzeugkäufer zumindest gedanklich zukünftige Einsparungen diskontieren, wird in vergleichbaren Studien und Berechnungen bei statischen Amortisationsrechnungen ein etwas kürzerer Betrachtungszeitraum von vier Jahren gewählt [MOC10] [ADA13]. Dieser Zeitraum wird deshalb auch im Rahmen dieser Studie angesetzt. Zur Überprüfung der Sensitivität der Berechnungsergebnisse auf die Betrachtungsdauer werden jedoch zusätzliche Analysen angestellt.

Es ist anzunehmen, dass gewerbliche Kunden stets streng rational im Sinne eines „Homo oeconomicus“, dem nutzenmaximierenden, theoretischen Modell der Wirtschaftswissenschaften, entscheiden. Gewerbliche Kunden erwerben demnach im Rahmen des hier verwendeten Modells streng jenes Technologiepaket, welches im Betrachtungszeitraum für sie die größte positive Differenz zwischen kumulierten Einsparungen und der anfänglichen Investitionssumme bietet.

Im Unterschied zu gewerblichen Kunden handelt der private Kunde nicht immer streng rational. Manche Kundengruppen sind dazu bereit, für besonders fortschrittliche Technologien

Mehrkosten in Kauf zu nehmen, die sich im angenommen Betrachtungszeitraum nicht oder nicht in vollem Umfang durch ersparte Kraftstoffkosten amortisieren. Innerhalb der privaten Kundengruppe werden daher fünf Untergruppen differenziert, die in unterschiedlichem Umfang nicht amortisierbare Mehrkosten akzeptieren, vgl. Abb. 6-6. 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. Anteilsmäßig repräsentieren die „Early Majority“ und „Late Majority“ mit je 34 % den größten Anteil der Käufer 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 [ROG62] [MOC10]. Innerhalb des Intervalls der individuellen Mehrkostenbereitschaft wählen die privaten Kunden das fortschrittlichste Technologiepaket aus.

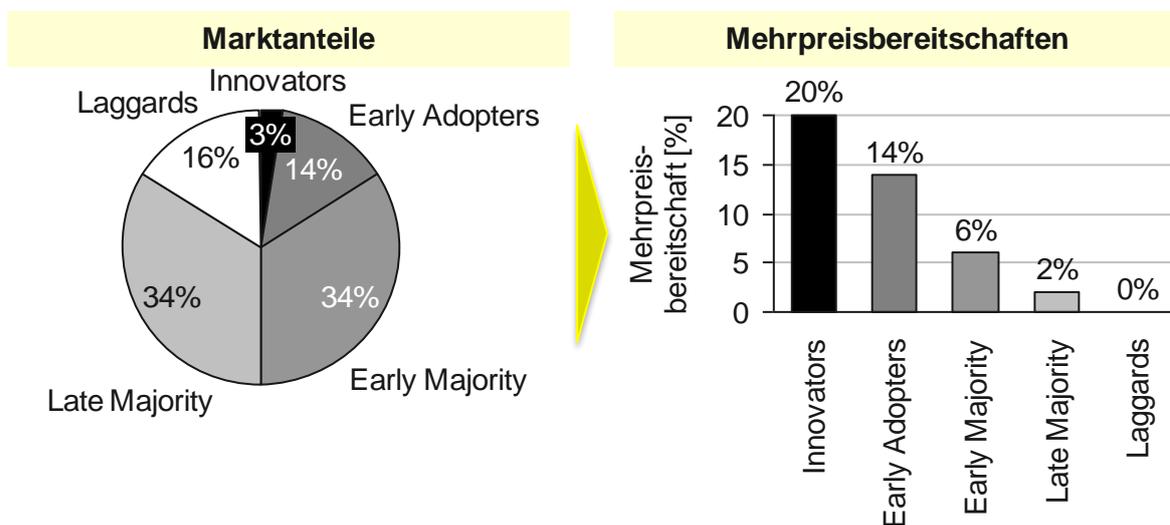


Abb. 6-6: Mehrpreisbereitschaft der Kundengruppen [ROG62] [MOC10]

6.4 Definition abstrahierter Fahrzeughersteller

Im Folgenden werden drei abstrahierte Hersteller definiert, deren Fokus im Produktportfolio auf jeweils unterschiedlichen Segmenten liegt. Im Bereich der Pkw und LNF lassen sich auf Basis des realen Fahrzeugmarktes drei wesentliche Typen von Herstellern identifizieren, vgl. Abb. 6-7. Kleinwagenhersteller (Pkw1a/b) verkaufen praktisch ausschließlich Fahrzeuge des SEG-1 und SEG-2, wobei der Fokus auf Pkw des SEG-1 liegt. Auch das Produktportfolio eines typischen Mittelklasse-Volumenherstellers (Pkw2a/b) umfasst diese beiden Fahrzeugsegmente, im Unterschied zu einem Kleinwagenhersteller liegt hier jedoch der Fokus auf SEG-2.

Ein Premiumhersteller (Pkw3a/b) setzt als einziger Herstellertyp auch Fahrzeuge in der Ober- und Luxusklasse (SEG-3) ab. Der Schwerpunkt seines Produktportfolios liegt in SEG-2. Da im Pkw-Markt ein genereller Trend in Richtung Kleinwagen (SEG-1) zu beobachten ist, bestehen auch für die abstrahierten Hersteller entsprechende strategische Optionen

der Portfolioentwicklung. Zur Analyse der Effekte dieser Entwicklung wird jeder abstrahierte Hersteller zusätzlich zu seiner originären Ausprägungsform („a“) in einer zweiten Variante („b“) definiert.

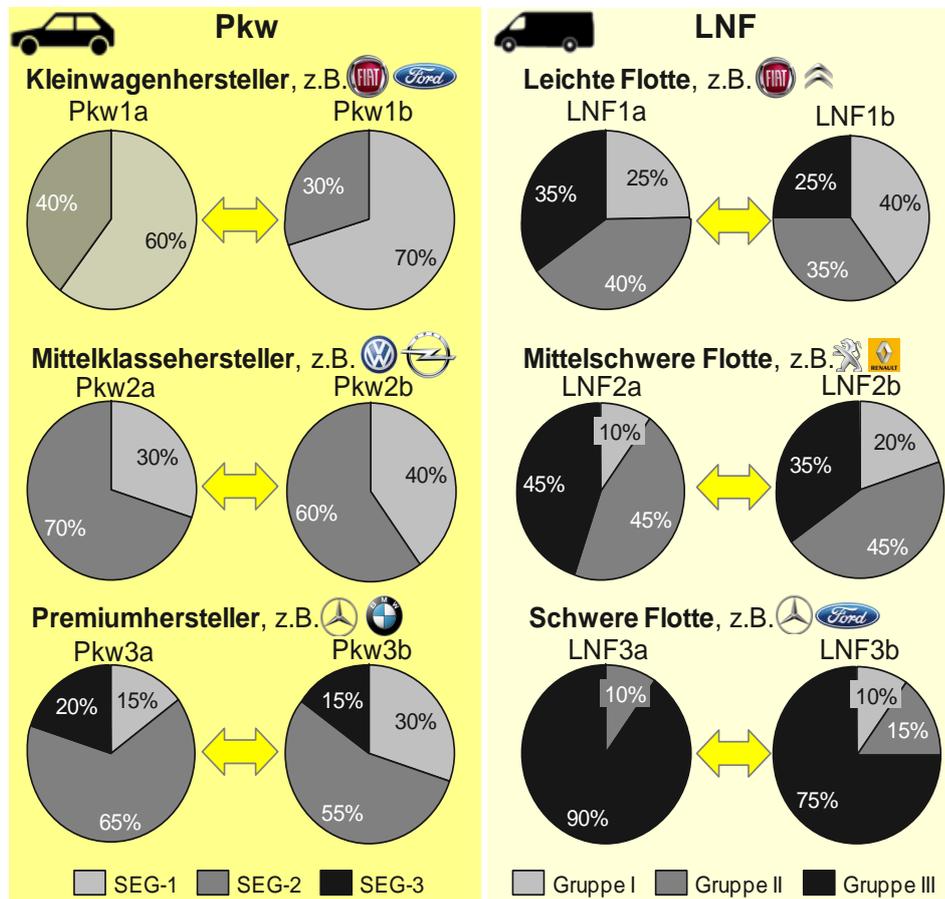


Abb. 6-7: Definition abstrahierter Pkw- und LNF-Hersteller

Ähnlich wie bei den Pkw ergeben sich für LNF ebenfalls drei verschiedene Herstellertypen (LNF1a/b, LNF2a/b, LNF3a/b). Abhängig von der Zusammensetzung ihrer Portfolios wird nach Herstellern mit leichter, mittelschwerer und schwerer Flotte unterschieden. Es wird angenommen, dass auch für LNF-Hersteller eine strategische Option darin besteht, ihr Portfolio hinsichtlich der Gruppe I auszuweiten. Daher werden auch für LNF die abstrahierten Hersteller jeweils in einer zweiten Ausprägungsform definiert.

Die abstrahierten Hersteller werden ferner hinsichtlich des durchschnittlichen Fahrzeugnettopreises pro verkauftes Fahrzeug beschrieben, um die finanziellen Auswirkungen alternativer zukünftiger Grenzwertkurven analysieren zu können. Der Fahrzeugnettopreis repräsentiert den durchschnittlichen Fahrzeugpreis in der EU exklusive der Mehrwertsteuer. Grundsätzlich liegen die Fahrzeugpreise pro Fahrzeug bei Premiumherstellern (Pkw3a/b) auf weit höherem Niveau als bei Kleinwagen- und Volumenherstellern, vgl. Abb. 6-8. Im Bereich der LNF existieren aufgrund der Preissensibilität der Kunden keine Premiumhersteller im engeren Sinne.

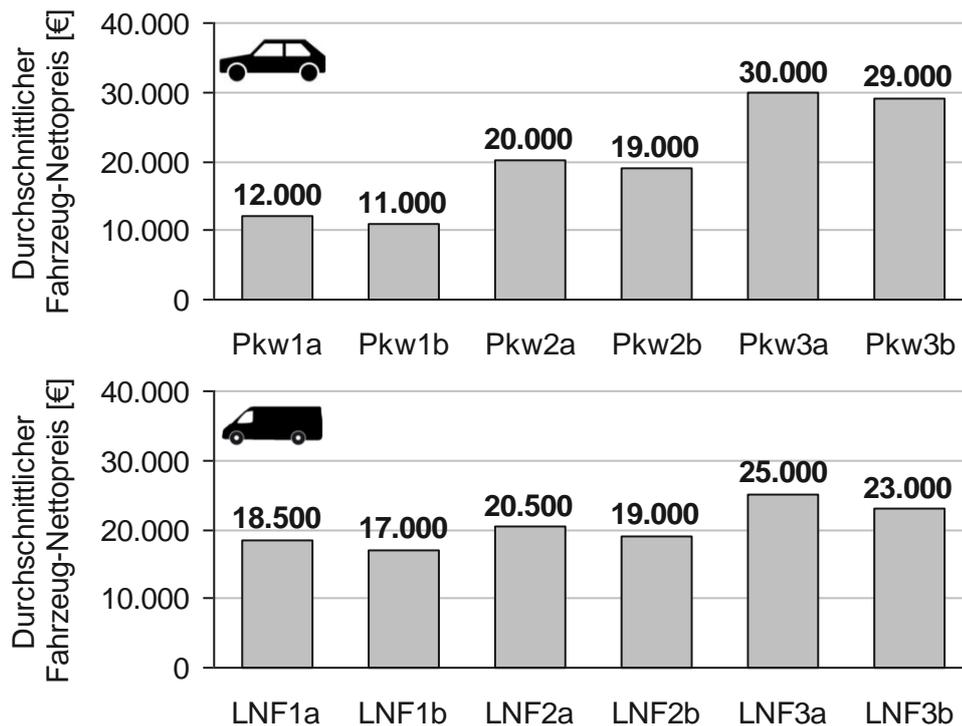


Abb. 6-8: Annahmen zu durchschnittlichen Fahrzeugneupreisen der abstrahierten Hersteller (Abschätzung auf Basis von Herstellerangaben)

Die folgenden Betrachtungen und Analysen basieren auf den angegebenen Portfoliozusammensetzungen und gelten für die abstrahierten Hersteller. Einzelne reale Hersteller können jedoch durchaus andere Strategien verfolgen, z.B. eine Ausweitung des Portfolios in Richtung des Oberklassensegments.

6.5 Wirtschaftliche CO₂-Flottenemissionen

6.5.1 Ergebnisse für Pkw – Segmente

In allen Segmenten und bezüglich aller Kraftstoffarten fallen die einzelnen Kundengruppen (gewerblich und privat mit unterschiedlichen Mehrpreisbereitschaften) spezifische Investitionsentscheidungen hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Technologiepakete. Aus der Wahl der Technologiepakete ergibt sich aggregiert die durchschnittliche Flottenemission, die sich unter den gegebenen Rahmenbedingungen und Szenarioannahmen alleine auf Basis des Marktgeschehens in den Betrachtungsjahren 2025 und 2030 einstellen würde.

Abb. 6-9 zeigt die Flottenemissionen in den Jahren 2025 und 2030 in den einzelnen Pkw-Segmenten und die sich daraus ergebenden durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen der gesamten EU-Neufahrzeugflotte bei einer gleichbleibenden Marktverteilung, ohne Berücksichtigung einer eventuellen, weitergehenden CO₂-Emissionssenkung durch Supercredits oder Ökoinnovationen.

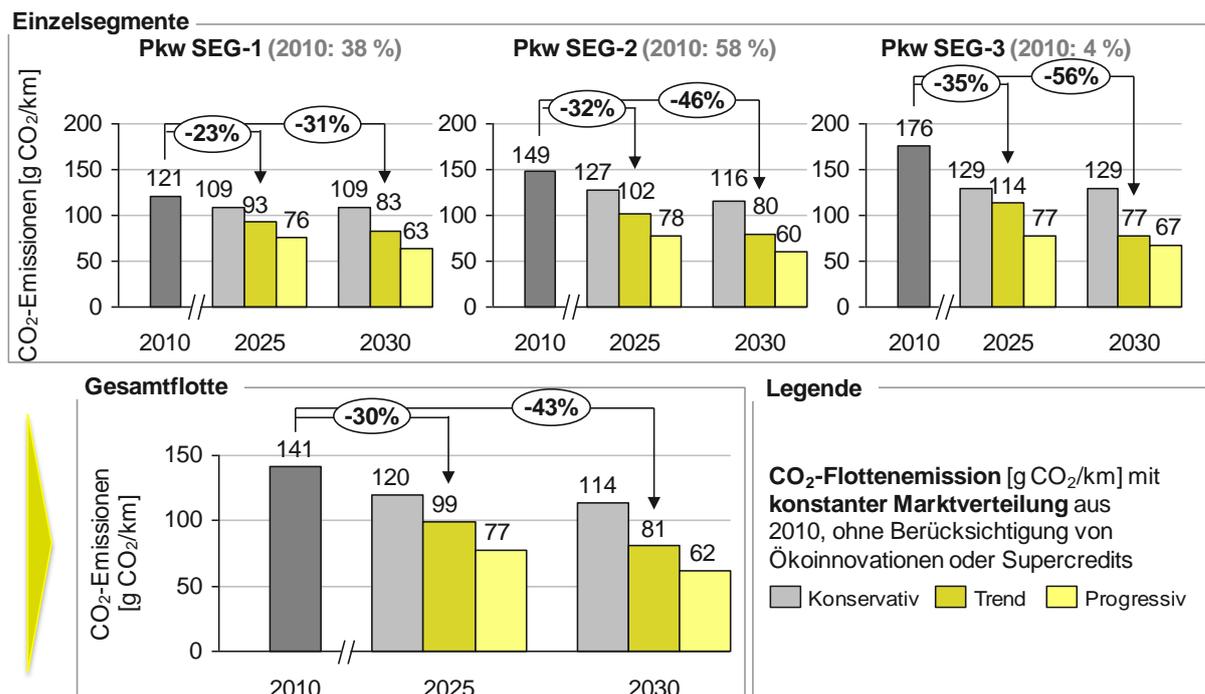


Abb. 6-9: Zusammenfassung der Flottenemissionen 2025 und 2030 für Pkw bei gleichbleibender Marktverteilung, ohne Ökoinnovationen

Es ist ersichtlich, dass die durchschnittlichen Flottenemissionen der gesamten Neuwagenflotte im Trendszenario von ca. 141 g CO₂/km im Basisjahr 2010 auf 99 g CO₂/km im Jahr 2025 sinken, was einem Rückgang von ca. 30 % entspricht. Demnach wird bei einer gleichbleibenden Marktzusammensetzung ohne Anrechnung von Ökoinnovationen und ohne Supercredits der für 2021 anvisierte Zielwert von 95 g CO₂/km in diesem Trendszenario nicht vollständig erreicht. Dies hat seinen primären Grund darin, dass es im Trendszenario für durchschnittliche Kunden nicht die wirtschaftlich beste Option ist, in Hybridtechnologien zu investieren. Zwar amortisieren sich hybride Technologiepakete für viele Kunden im Betrachtungszeitraum, konventionelle Technologiepakete erweisen sich jedoch durch den deutlich geringeren anfänglichen Investitionsbetrag (Fahrzeugkaufpreis) im Betrachtungszeitraum als ökonomisch vorteilhafter. Im Trendszenario werden bis 2030 bezüglich der hybriden Technologien verstärkte kostensenkende Lerneffekte erwartet, so dass es zu einer deutlichen Marktdiffusion von hybriden Technologiepaketen (Mild- und Fullhybrid) und PHEV-Technologiepaketen kommt. Infolgedessen sinkt die durchschnittliche Flottenemission bei gleichbleibender Marktzusammensetzung bis 2030 im Trendszenario auf ca. 81 g CO₂/km ab, was einem Rückgang von ca. 43 % gegenüber dem Basisjahr 2010 entspricht.

Über die gezeigten Ergebnisse in Abb. 6-9 hinaus kann die Senkung der CO₂-Flottenemissionen auch durch Verschiebungen im Fahrzeugmarkt hinsichtlich der segmentweisen Zusammensetzung und der Verteilung der Kraftstoffarten, welche szenarienbasiert in Kapitel 5.1 definiert wurde, unterstützt werden. Während sich bei einem gleichbleibenden Marktanteil wie im Basisjahr 2010 im Trendszenario 99 g CO₂/km für das Jahr 2025 ergeben, wird

auf Basis der projizierten Marktverschiebungen eine Reduzierung auf 96 g CO₂/km erreicht, vgl. Abb. 6-10.

Wenn die derzeit mögliche Anrechnung von Ökoinnovationen in identischer Höhe von 7 g CO₂/km auch für die Betrachtungsjahre angenommen wird, sind im Trendszenario im Jahr 2025 insgesamt 89 g CO₂/km in der Gesamtflotte zu erreichen. Für das Jahr 2030 ergeben sich unter Einbeziehung des Marktstruktureffekts CO₂-Flottenemissionen in Höhe von 79 g CO₂/km ohne Ökoinnovationen, bzw. 72 g CO₂/km mit maximaler Anrechnung von Ökoinnovationen. Etwaige weitere Effekte durch Supercredits können in dieser Darstellung nicht pauschal quantifiziert werden. Unter Anwendung der derzeit formulierten Restriktionen, z.B. Multiplikatorhöhe von 2 und limitierte Anzahl anrechenbarer Fahrzeuge, könnten die CO₂-Flottenemissionen unter Anwendung von Supercredits darüber hinaus nur um wenige g CO₂/km gesenkt werden.

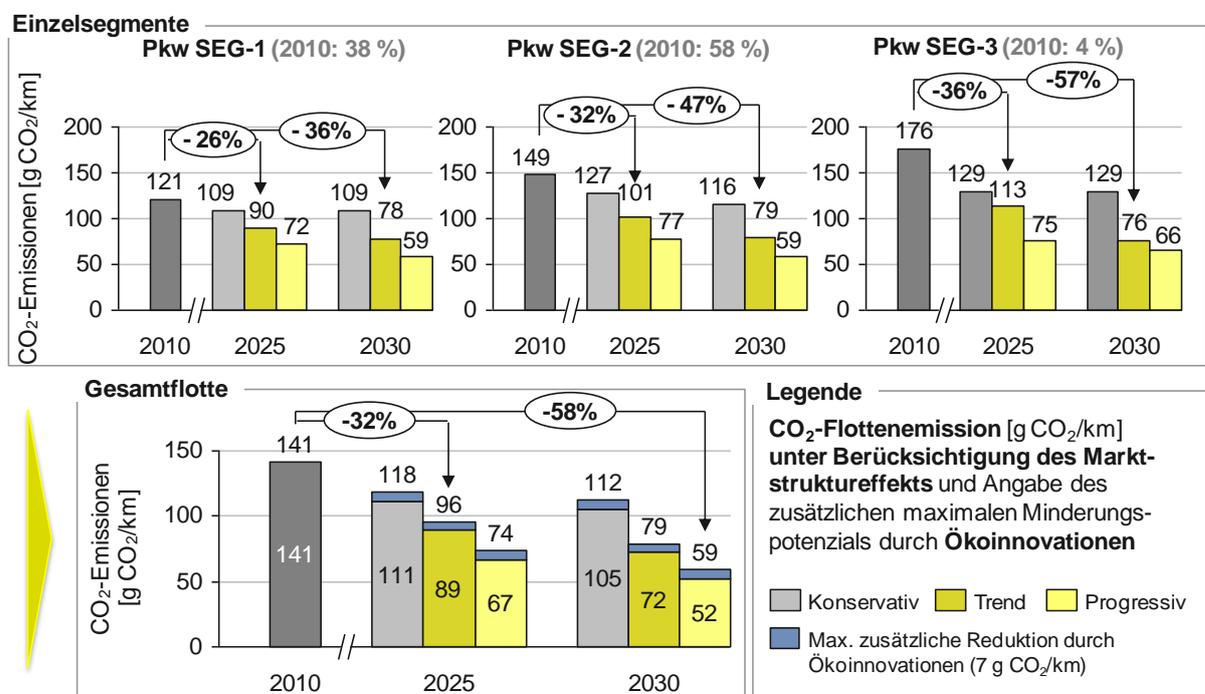


Abb. 6-10: Zusammenfassung der Flottenemissionen 2025 und 2030 für Pkw unter Berücksichtigung des Marktstruktureffekts, mit Ökoinnovationen

Insgesamt zeigt sich, dass der Effekt dieses Marktstruktureffekts im gesamten Betrachtungszeitraum in den Szenarien vergleichsweise klein ist. Dies kann damit begründet werden, dass sich auf Basis der Investitionsentscheidungen der Endkunden die CO₂-Emissionen in den einzelnen Fahrzeugsegmenten im Zeitverlauf immer weiter annähern und die Marktverteilung der Segmente damit abnehmend relevant für die Höhe der gesamten durchschnittlichen CO₂-Flottenemissionen wird. Wenn das Ergebnis auf die einzelnen Pkw-Segmente heruntergebrochen wird, ist zu erkennen, dass durch die Investitionsentscheidungen der Kunden die CO₂-Emissionen in den höheren Segmenten absolut und prozentual stärker sinken als in den niedrigeren Segmenten, z.B. im SEG-1. Dieser Trend setzt sich bis 2030 fort

und führt schließlich dazu, dass die Pkw in allen Segmenten durch ähnliche CO₂-Emissionswerte charakterisiert sind.

Die alternativen Szenarien spannen dabei ein im Betrachtungszeitraum größer werdendes Intervall zukünftig möglicher Entwicklungen auf. So würden im konservativen Szenario bis zum Jahr 2030 die Flottenemissionen lediglich auf 114 g CO₂/km ohne Marktstruktureffekt sinken, bzw. auf 112 g CO₂/km mit Marktstruktureffekt, wobei auch hier das weitergehende Potenzial in Höhe von maximal 7 g CO₂/km durch Anrechnung von Ökoinnovationen bestünde. Im progressiven Szenario würden aufgrund der veränderten Parameter bis zu 59 g CO₂/km unter Berücksichtigung des Marktstruktureffekts möglich. Diese niedrigen CO₂-Flottenemissionen könnten dadurch erreicht werden, dass für viele Kundengruppen im progressiven Szenario aufgrund höherer Kraftstoffpreise und niedrigerer Technologiekosten vermehrt PHEV-Technologiepakete wirtschaftlich würden. Je mehr PHEV-Technologiepakete in den Markt diffundieren, umso abhängiger ist das gesamte Berechnungsergebnis jedoch von der Art und Weise, wie die CO₂-Emissionen von PHEV auf Basis der Gesetzgebung berechnet und berücksichtigt werden.

In Abb. 6-11 werden die Ergebnisse in einem CO₂-Masse-Diagramm präzisiert. Eingetragen ist, welche Flottenemissionen sich im Trendszenario unter Berücksichtigung des Marktstruktureffekts in den einzelnen Segmenten (Index B: Benziner; Index D: Diesel, fett: gesamtes Segment) ergeben und wie sich im Zuge der Technologiepaketwahl die durchschnittliche Fahrzeugmasse in den einzelnen Segmenten und im Gesamtmarkt verändert. Die zusätzliche Anrechenbarkeit von Ökoinnovationen wird hier nicht betrachtet.

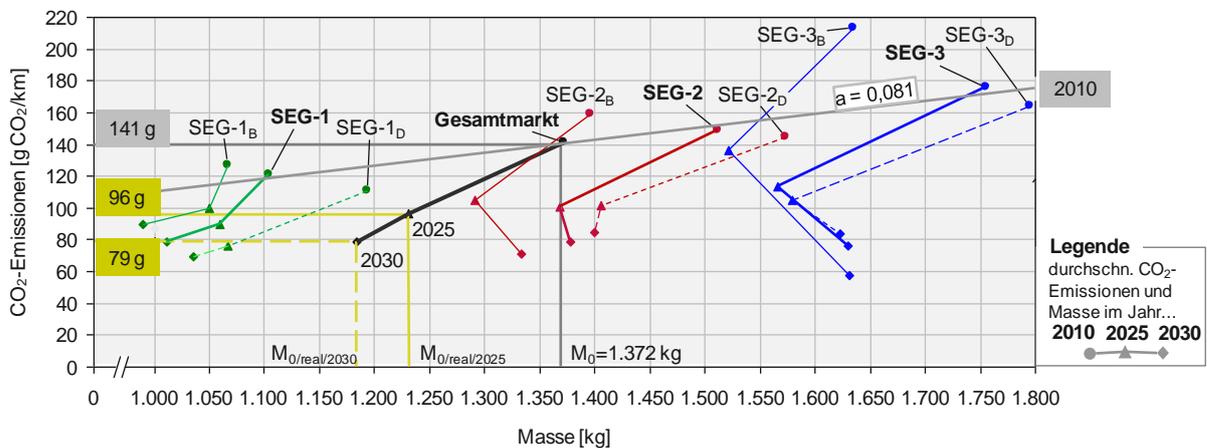


Abb. 6-11: Projektion der CO₂-Flottenemissionswerte bei Pkw auf Basis des Kundenverhaltens im Trendszenario

Es ist deutlich zu erkennen, dass das durchschnittliche Flottengewicht durch die Implementierung von stärkeren Leichtbaumaßnahmen im Zeitraum bis 2030 um annähernd 200 kg sinken würde. Ferner wird erneut sichtbar, dass durch die Investitionsentscheidungen der Kunden im Markt die CO₂-Flottenemissionen in höheren Fahrzeugsegmenten im Zeitverlauf überproportional sinken als in den niedrigeren Segmenten. Der Grund hierfür liegt in den

unterschiedlichen Fahrprofilen der Kunden sowie der aktuell gültigen CO₂-Berechnung für Plug-in-Hybride. In höheren Segmenten werden durchschnittlich höhere Kilometerleistungen im Jahr zurückgelegt, wodurch sich fortschrittliche kraftstoffsparende Technologiepakete im Betrachtungszeitraum amortisieren würden.

In den Jahren 2025 und 2030 wäre demnach ein signifikant schwächerer Zusammenhang zwischen CO₂-Emission und Fahrzeugmasse zu erwarten als er heute im Markt vorzufinden ist (Status quo: + 8,1 g CO₂/km pro 100 kg Massedelta). Dieser Zusammenhang lässt sich durch die Berechnung entsprechender Regressionsgeraden quantifizieren und visualisieren, vgl. Abb. 6-12.

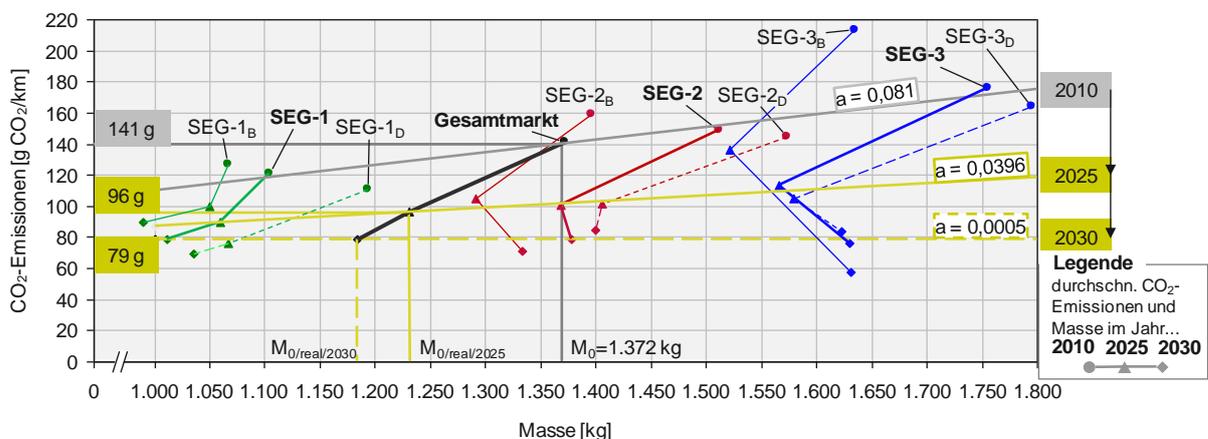


Abb. 6-12: Ableitung von Regressionsgeraden bei Pkw auf Basis des Kundenverhaltens im Trendszenario

Während der Status quo im Jahr 2010 bei einer Flottendurchschnittsemission von ungefähr 141 g CO₂/km durch eine Geradensteigung von 0,081 gekennzeichnet ist, flacht die entsprechende Gerade im Berechnungsmodell über der Zeit zunehmend ab. Im Jahr 2025 würde die Steigung im Trendszenario bei 0,0396 liegen. Bis 2030 würde sich alleine auf Basis der Investitionsentscheidungen der Kunden im Markt eine Geradensteigung nahe Null einstellen. Dies würde einem masseunabhängigen Grenzwert entsprechen.

Die zunehmende Entkopplung von CO₂-Emissionen und Fahrzeugmasse geht auf die unterschiedliche kundengetriebene Hybridisierungsnachfrage in den einzelnen Segmenten zurück, vgl. Abb. 6-13. Während in diesem Szenario bis 2025 für die Käufer keine hybriden Technologiepakete wirtschaftlich würden, wäre für rund 16 % aller Käufer im Jahr 2030 ein Technologiepaket mit Mild- oder Full-Hybrid, für weitere 7 % ein PHEV-Technologiepaket die vorteilhafteste Investitionsalternative. Die Hybridisierung wächst jedoch bei höheren Fahrzeugsegmenten, im SEG-3 ist im Jahr 2030 für 29 % der Plug-in-Hybrid die wirtschaftlichste Alternative, Mild- oder Fullhybride für weitere 52 %. Für die weitere Entwicklung der CO₂-Flottenemissionen ist es daher von ausschlaggebender Relevanz, ob und inwiefern Mild-, Full- und Plug-in-Hybride für private und gewerbliche Kunden wirtschaftlich attraktiv werden.

Marktanteile von HEV- und PHEV-Technologiepaketen							
Zeitschritt	Marktsegment	Konservativ		Trend		Progressiv	
		HEV	PHEV	HEV	PHEV	HEV	PHEV
2025	Gesamtmarkt	0 %	0 %	0 %	0 %	39 %	9 %
	SEG-1	0 %	0 %	0 %	0 %	44 %	0 %
	SEG-2	0 %	0 %	0 %	0 %	33 %	15 %
	SEG-3	0 %	0 %	0 %	0 %	52 %	30 %
2030	Gesamtmarkt	0 %	0 %	16 %	7 %	58 %	11 %
	SEG-1	0 %	0 %	0 %	0 %	58 %	0 %
	SEG-2	0 %	0 %	34 %	14 %	58 %	25 %
	SEG-3	0 %	0 %	52 %	29 %	63 %	28 %

Abb. 6-13: Kundengetriebene Hybridisierungsnachfrage der Pkw-Flotte

6.5.2 Ergebnisse für Pkw – Abstrahierte Fahrzeughersteller

Im folgenden Kapitel werden Implikationen für die abstrahierten Hersteller aus der Untersuchung des Kundeninvestitionsverhaltens abgeleitet. Dazu werden die segmentspezifischen Ergebnisse aus den vorigen Abschnitten auf das Produktportfolio der abstrahierten Hersteller projiziert.

In Abb. 6-14 werden die Berechnungsergebnisse für das Jahr 2025 in den drei behandelten Szenarien in einem CO₂-Masse-Diagramm dargestellt. Zusätzlich sind die entstehenden Regressionsgeraden eingezeichnet. Gemäß den Ergebnissen auf Segmentebene würden alle Pkw-Hersteller eine deutliche Reduzierung ihrer CO₂-Flottenemissionen erreichen. Die eingeführten Leichtbaumaßnahmen in den Technologiepaketen bewirken zudem eine Verringerung der Flottenmasse. Segmentspezifische Unterschiede wirken sich jedoch auch auf Herstellerebene dahingehend aus, dass sich durch das Kundenverhalten bei Premiumherstellern (Pkw3a/3b) die Flottenemissionen deutlich stärker reduzieren würden als bei Herstellern mit Schwerpunkt im Kleinst- und Kleinwagenbereich (Pkw1a/1b). Die Marktsituation der einzelnen abstrahierten Hersteller würde im Trendszenario bestmöglich durch eine Geradensteigung von 0,0421 abgebildet. Würde in diesem Szenario für das Jahr 2025 eine Grenzwertkurve implementiert, die einen durchschnittlichen Flottengrenzwert von etwa 96 g CO₂/km (ohne Ökoinnovationen) über eine Geradensteigung von 0,0421 einstellt, wären alle hier betrachteten abstrahierten Hersteller in der Lage, ihren individuellen Zielwert zu erreichen. Diese eingezeichnete Grenzwertkurve verkörpert im Trendszenario eine technisch machbare und wirtschaftlich vertretbare Grenzwertkurve.

Die derzeitige legislative Geradensteigung von 0,0457 kommt diesem Wert sehr nahe. Bei Anwendung der ab dem Jahr 2020/2021 verwendeten Geradensteigung von 0,0333 wären die Hersteller Pkw3a/3b (Premiumfokus) leicht benachteiligt. Durch eine masseunabhängige

Definition des Grenzwertes ($a = 0,0$) wären Hersteller mit Schwerpunkt im Kleinwagensegment deutlich im Vorteil.

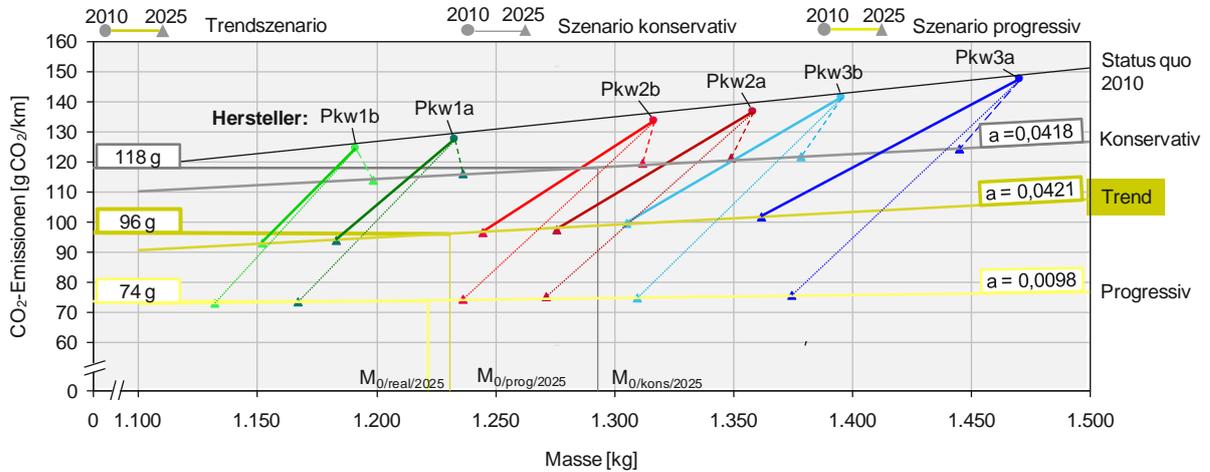


Abb. 6-14: Wirtschaftlich akzeptable bzw. vertretbare Grenzwertkurven für Pkw im Jahr 2025 für die drei Szenarien

Bei Weiterentwicklung der Grafik für das Modellierungsjahr 2030 kommt es in allen betrachteten Szenarien zur weiteren deutlichen Abflachung der balancierten Grenzwertkurven. Im Trendszenario kommt es sogar zu einer leicht negativen Geradensteigung, vgl. Abb. 6-15.

Demzufolge deuten die Berechnungsergebnisse für das Jahr 2030 im progressiven und im Trendszenario auf eine Eignung eines masseunabhängig definierten Grenzwertes hin. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die starke Abflachung möglicher zukünftiger Grenzwertkurven auf der Messmethode von PHEV nach ECE R101 beruht. Eine zukünftig mögliche Revision dieser Norm, z.B. im Rahmen der WLTP-Einführung, könnte sich stark auf die präsentierten Berechnungsergebnisse auswirken.

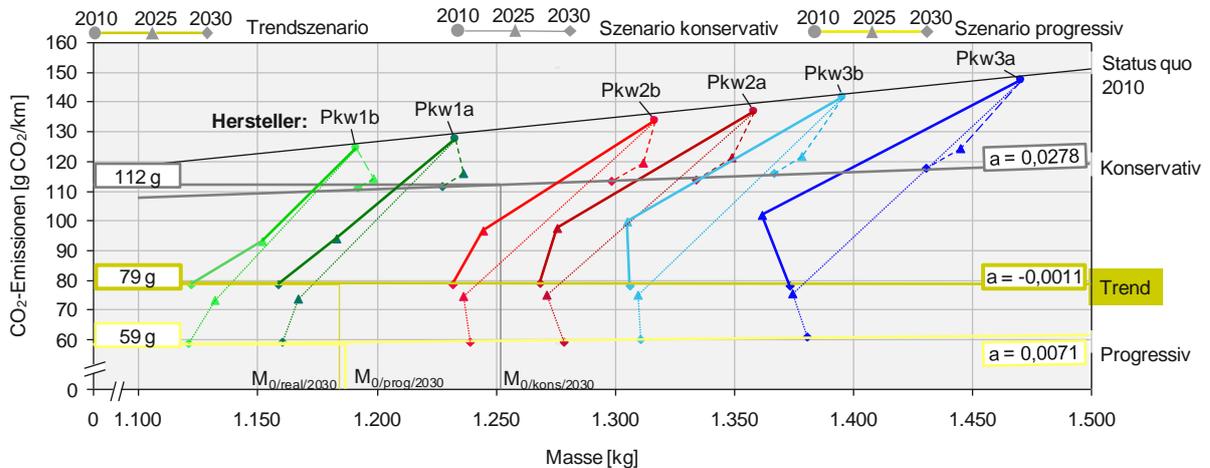


Abb. 6-15: Wirtschaftlich akzeptable bzw. vertretbare Grenzwertkurven für Pkw im Jahr 2030 für die drei Szenarien

6.5.3 Ergebnisse für LNF – Gruppen

Die Kunden von LNF (100 % gewerblich) treffen ebenso wie bei den Pkw in allen Gruppen und bezüglich aller Kraftstoffarten spezifische Investitionsentscheidungen bezüglich der zur Verfügung stehenden Technologiepakete. Werden alle Investitionsentscheidungen der Kunden am Markt zusammengefasst, ergeben sich die durchschnittlichen Flottenemissionen in den Betrachtungsjahren 2025 und 2030 für LNF.

In Abb. 6-16 sind die Flottenemissionen für die Jahre 2025 und 2030 in den einzelnen LNF-Gruppen und die sich daraus ergebenden durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Gesamtflotte dargestellt. Ebenso wie bei Pkw bleiben auch hier der Marktstruktureffekt und die Potenziale möglicher Ökoinnovationen auf die durchschnittlichen Flottenemissionen zunächst unberücksichtigt.

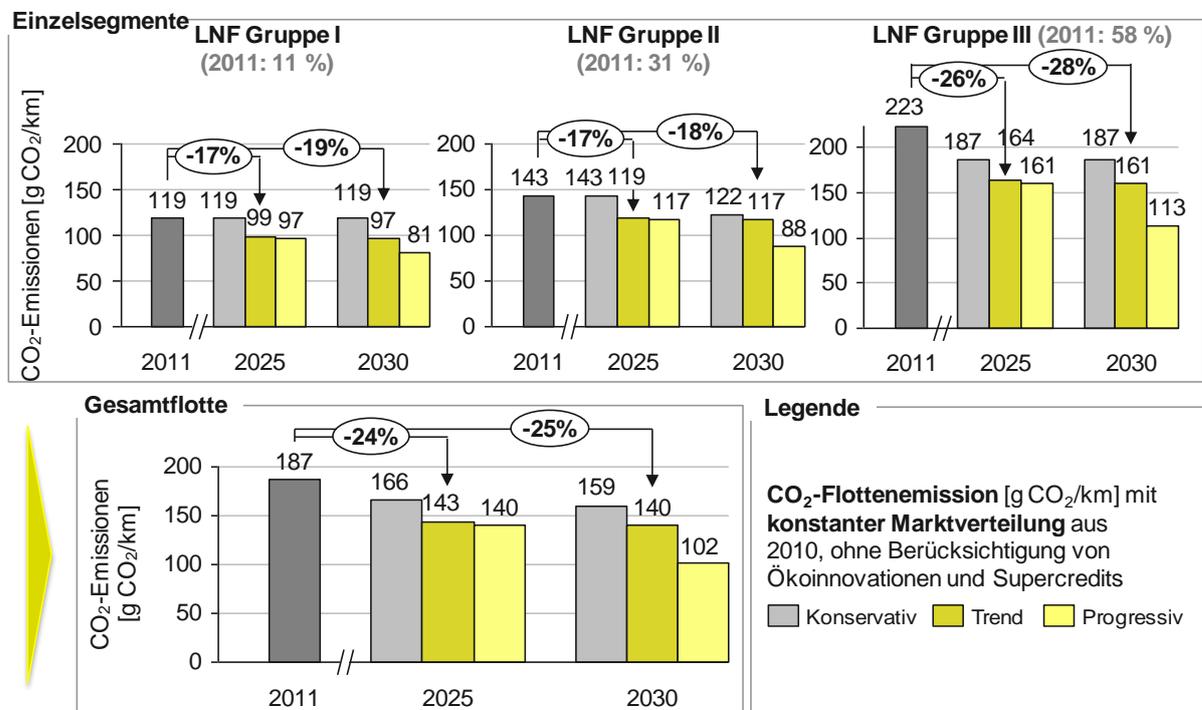


Abb. 6-16: Zusammenfassung der Flottenemissionen 2025 und 2030 für LNF bei gleichbleibender Marktverteilung, ohne Ökoinnovationen

Im Trendszenario würden die durchschnittlichen Flottenemissionen von 187 g CO₂/km im Basisjahr 2011 auf 143 g CO₂/km im Jahr 2025 sinken. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 24 %. Zwischen 2025 und 2030 würden die CO₂-Flottenemissionen im Trendszenario nur um weitere 3 g auf 140 g CO₂/km sinken. Im progressiven Szenario wäre dagegen eine deutlich größere Reduktion in Höhe von 38 g auf 102 g CO₂/km im Jahr 2030 möglich. Im Zuge der unterschiedlichen Szenarioannahmen erstreckt sich das Intervall der möglichen CO₂-Flottenemissionen im Jahr 2030 zwischen 102 g CO₂/km im progressiven Szenario und 159 g CO₂/km im konservativen Szenario. Der Grund für diese höhere Unsicherheit ist der Anteil von LNF der Gruppe III am Gesamtmarkt, welcher bei ca. 60 % liegt. Die Entwicklung

dieser Fahrzeuggruppe bestimmt die Entwicklung des Gesamtmarktes maßgeblich. Im Trendszenario würden aus Kundensicht in Gruppe III keine hybriden Technologiepakete gewählt, weshalb die CO₂-Reduktion insgesamt niedrig ausfällt. Nur im progressiven Szenario wäre ab 2030 der Einsatz von hybriden Technologiepaketen in Gruppe III aus Kundensicht am wirtschaftlichsten, weshalb zwischen 2025 und 2030 eine deutliche Reduktion der CO₂-Flottenemissionen erzielt würde.

Der Einfluss des Marktstruktureffekts fällt im Betrachtungszeitraum etwas größer aus als bei Pkw und geht im Wesentlichen auf den Einsatz von Gasfahrzeugen und BEV gemäß den Szenarioannahmen zurück, vgl. Abb. 6-17. Würden zusätzlich auch Ökoinnovationen im maximal möglichen Umfang von 7 g CO₂/km angesetzt, ließen sich die rechnerischen CO₂-Flottenemissionen im Trendszenario im Jahr 2025 theoretisch auf 133 g CO₂/km senken und im Jahr 2030 auf 128 g CO₂/km.

Bei Betrachtung der einzelnen LNF Gruppen ist zu erkennen, dass durch die Investitionsentscheidung der Kunden die CO₂-Emissionen in den höheren Gruppen absolut und prozentual stärker sinken würden als in den niedrigeren Gruppen, z.B. in Gruppe I. Wesentlicher Grund hierfür ist, dass die durchschnittlichen jährlichen Fahrleistungen in diesen Gruppen etwas höher liegen als in Gruppe I und sich deshalb auch fortgeschrittene Technologiepakete im Betrachtungszeitraum amortisieren können. Dieser Trend setzt sich bis 2030 fort und würde schließlich dazu führen, dass sich der Unterschied in den CO₂-Emissionswerten zwischen den LNF Gruppen reduziert.

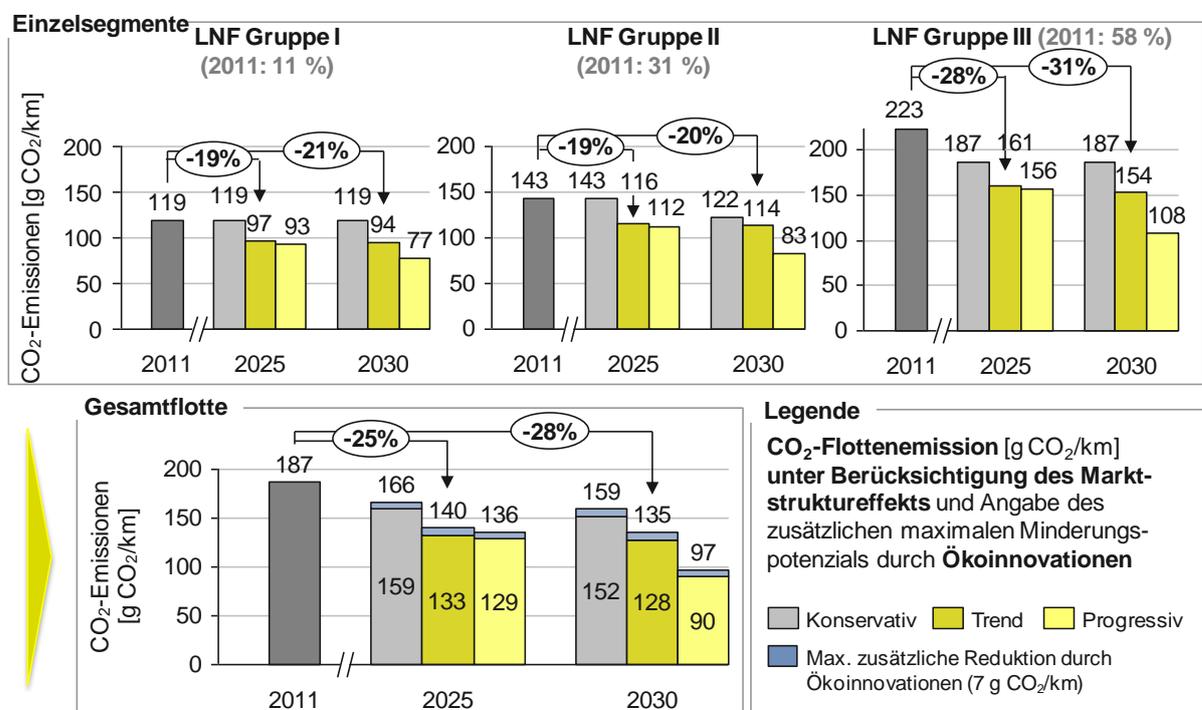


Abb. 6-17: Zusammenfassung der Flottenemissionen 2025 und 2030 für LNF unter Berücksichtigung des Marktstruktureffekts, mit Ökoinnovationen

In Abb. 6-18 werden die Ergebnisse der Kundeninvestitionsentscheidungen graphisch dargestellt. Durch die Kundenwahl der Technologiepakete ergibt sich einerseits eine Reduktion der CO₂-Emissionen, welche in Gruppe III besonders ausgeprägt ist. Andererseits verringert sich durch die in den Technologiepaketen enthaltenen Leichtbaumaßnahmen die durchschnittliche Fahrzeugmasse in jeder Gruppe. Im Gesamtmarkt würde sich eine Massenreduktion um ca. 60 kg ergeben.

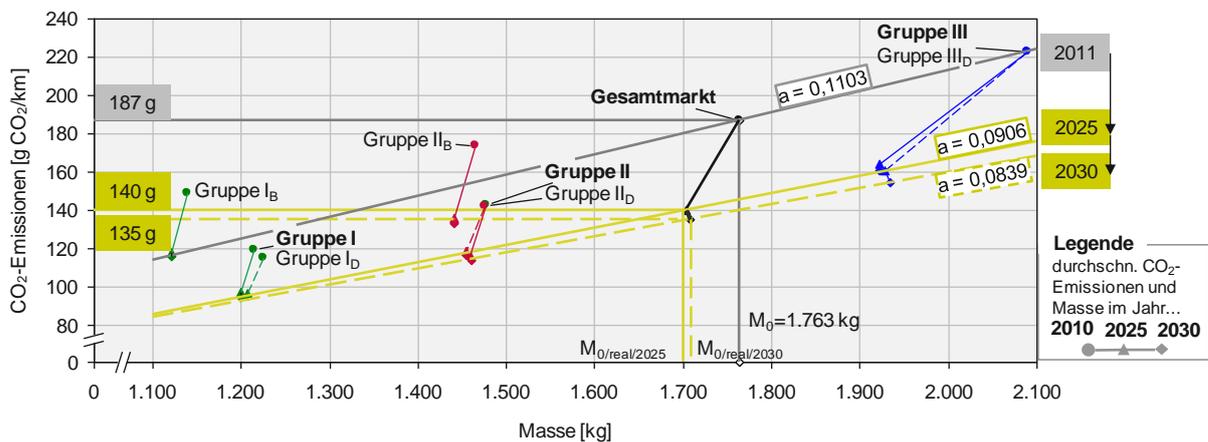


Abb. 6-18: Wirtschaftlich akzeptable bzw. vertretbare Grenzwertkurven für LNF im Trend-szenario

Die Steigung der entsprechenden Regressionsgerade würde von 0,1103 im Basisjahr 2011 auf 0,0906 im Jahr 2025 bzw. auf 0,0839 im Betrachtungszeitpunkt 2030 sinken. Obwohl sich wie bei Pkw zukünftig eine geringere Massenabhängigkeit der Grenzwertkurve einstellt, fällt dieser Effekt im Vergleich zu den Betrachtungen bei Pkw moderat aus. Der Grund hierfür ist, dass in allen Segmenten ausschließlich konventionelle Technologiepakete eingesetzt werden, weshalb der Emissionswert in allen Gruppen vergleichsweise gleichmäßig sinkt. Die in der Gesetzgebung ab 2017 vorgesehene Geradensteigung würde mit 0,093 zwischen dem Wert von 2011 und dem errechneten Wert für das Jahr 2025 im Trendszenario liegen.

6.5.4 Ergebnisse für LNF – Abstrahierte Fahrzeughersteller

Wie bei den Herstellern für Pkw ergeben sich auch für die LNF-Hersteller verschiedene Auswirkungen, wenn die Untersuchungsergebnisse von der Gruppenebene auf die Portfolio-gestaltung der Hersteller projiziert werden. Diese Auswirkungen werden im Folgenden beschrieben.

In Abb. 6-19 sind die Auswirkungen der Kundenentscheidungen für die entsprechenden Technologiepakete auf die CO₂-Flottenemissionen der abstrahierten LNF-Hersteller dargestellt. In das CO₂-Masse-Diagramm sind außerdem die resultierenden Regressionsgeraden eingezeichnet. Bei allen abstrahierten Herstellern ist eine deutliche Verringerung der CO₂-Flottenemissionen zu beziffern. Bei Betrachtung der Flottengewichte ist zu erkennen, dass sich das Durchschnittsflottengewicht der Hersteller LNF3a/3b im Vergleich zu den anderen

abstrahierten Herstellern am stärksten reduziert. Die im Trendszenario für das Jahr 2025 abgebildete Regressionsgerade mit einer Steigung von 0,09 wird von allen abstrahierten Herstellern erreicht und würde daher in diesem Szenario eine balancierte zukünftige Grenzwertkurve darstellen. Bei einer geringeren Steigung würden Hersteller mit einer schweren Fahrzeugflotte überproportional belastet.

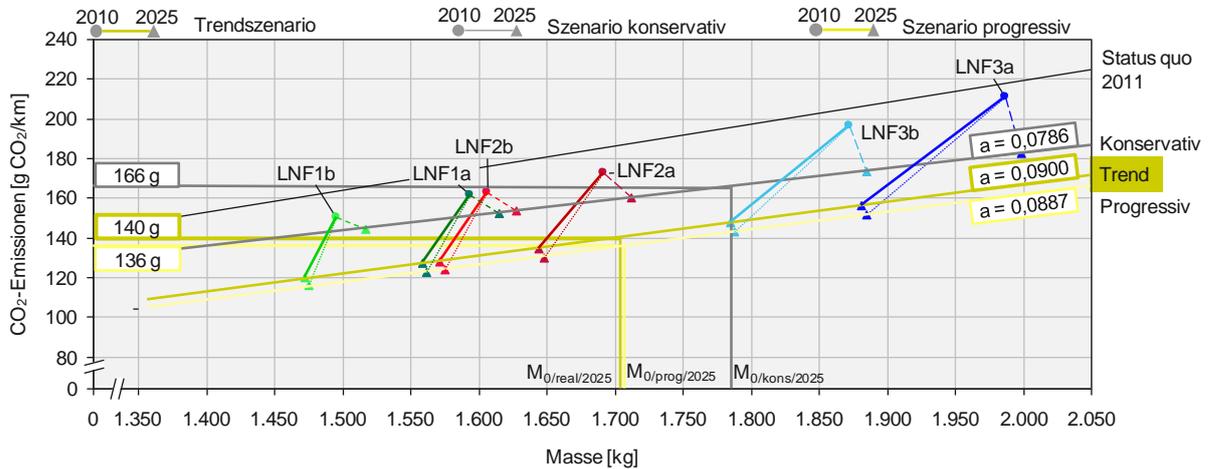


Abb. 6-19: Wirtschaftlich akzeptable bzw. vertretbare Grenzwertkurven für abstrahierte LNF Hersteller im Jahr 2025 in den drei Szenarien

Bei der Ergebnisanalyse für das Jahr 2030 variieren die ermittelten Steigungen der Regressionsgeraden stark in den unterschiedlichen Szenarien, vgl. Abb. 6-20.

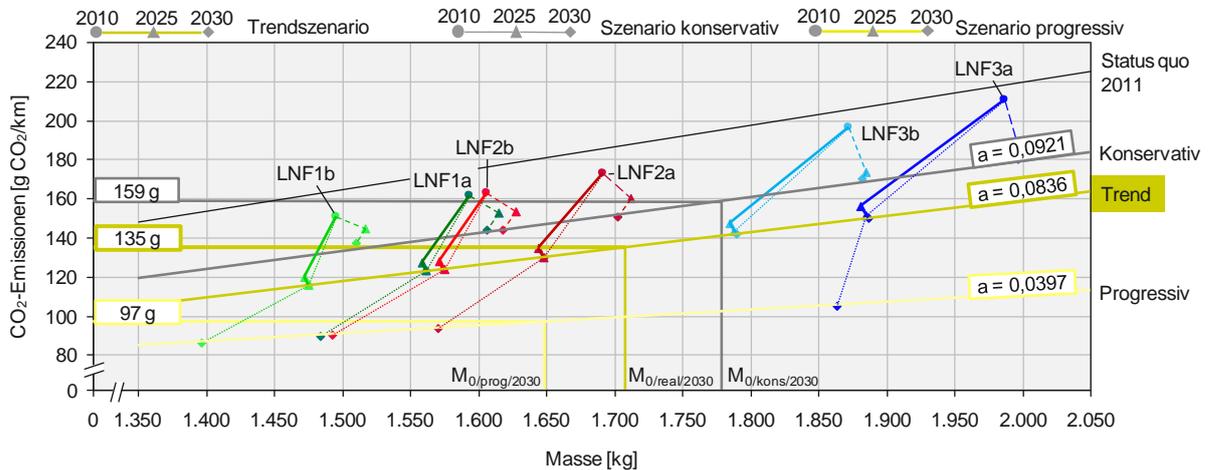


Abb. 6-20: Wirtschaftlich akzeptable bzw. vertretbare Grenzwertkurven für abstrahierte LNF Hersteller im Jahr 2030 in den drei Szenarien

Während sich die Steigung von 0,1103 im Basisjahr 2011 auf 0,0921 im konservativen und 0,0836 im Trendszenario nur moderat reduzieren würde, wäre im progressiven Szenario eine deutliche Verringerung auf 0,0397 zu verzeichnen, wie in Abb. 6-20 zu erkennen ist. Begründet werden kann dieser Effekt mit dem großen Einfluss der LNF Gruppe III, für die im pro-

gressiven Szenario hybride Technologiepakete gewählt würden und deren Emissionen daher stark absinken würden.

6.5.5 Sensitivitätsanalysen

Im Zuge der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden verschiedene quantitative Annahmen in das Berechnungsmodell eingeführt. Hierzu zählen die Ableitung des Endkundenlistenpreises der Technologiepakete aus den Herstellkosten über einen pauschalen prozentualen Aufschlag, die Dimensionierung von PHEV/REEV Fahrzeugen sowie der Amortisationszeitraum der privaten und gewerblichen Kunden bei ihren Investitionsentscheidungen. In diesem Kapitel soll untersucht werden, welchen Einfluss Änderungen dieser Eingangsparameter auf die abgeleiteten Flottenemissionen und Grenzwertkurven haben.

6.5.5.1 Sensitivität auf Änderungen des Endkundenpreises der Technologien

Zur Definition des Endkundenlistenpreises aus den Herstellkosten wird in der Standardberechnung ein Aufschlag von 60 % (inkl. 20 % MwSt.) verwendet. Während dies einen Durchschnittswert für innovative, aber dennoch schon weitgehend etablierte Technologien darstellt, kann es in anderen Fällen zu niedrigeren oder auch weitaus höheren notwendigen Aufschlägen durch die Hersteller kommen. So kann z.B. für etablierte Technologien mit geringem Innovationsgrad 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. Bei innovativen, wettbewerbsdifferenzierenden Technologien kann hingegen in der Regel eine höhere Marge am Markt durchgesetzt werden. Gleichzeitig sind hierbei höhere Vertriebskosten hinsichtlich zusätzlicher Marketingmaßnahmen anzusetzen sowie erhöhte Rückstellungen für eventuelle Garantiefälle zu bilden.

Abb. 6-21 zeigt in einer tabellarischen Zusammenstellung den Effekt der entsprechenden Parametervariation auf die CO₂-Flottenemission und Geradensteigung für Pkw im Trend-szenario, Abb. 6-22 entsprechend für LNF. Sowohl bei Pkw als auch bei LNF zeigt das Modell die eindeutige positive Korrelation zwischen prozentualem Preisaufschlag und den absolut erreichbaren CO₂-Flottenemissionen. Erhöht sich durch einen größeren Preisaufschlag der Endkundenlistenpreis der einzelnen Technologien, amortisieren sich vorwiegend weniger fortschrittliche Technologiepakete im Betrachtungszeitraum. Gleichzeitig besteht ein deutlich positiv korrelierter Zusammenhang zur entsprechenden Geradensteigung. Während bei sehr niedrigen Preisaufschlägen von den Kunden hybride Technologien in den höheren Pkw-Segmenten bzw. LNF-Gruppen erworben werden, werden diese bei höheren Preisaufschlägen unwirtschaftlich. Es zeigt sich ein deutlicherer Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und Fahrzeugmasse, was eine steilere Geradensteigung impliziert. Dies rührt daher, dass in allen Segmenten gleichermaßen konventionelle Technologiepakete eingesetzt würden.

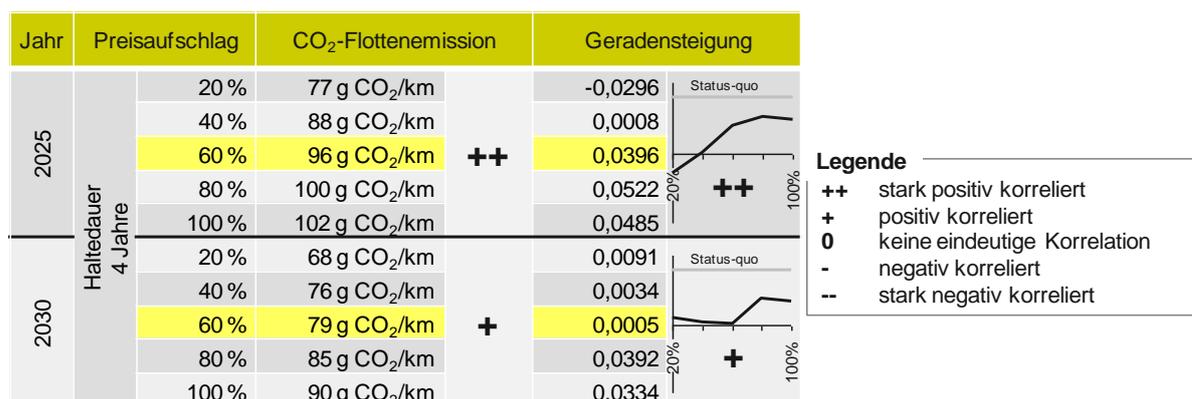


Abb. 6-21: Sensitivität auf veränderten Preisauflschlag bei Pkw

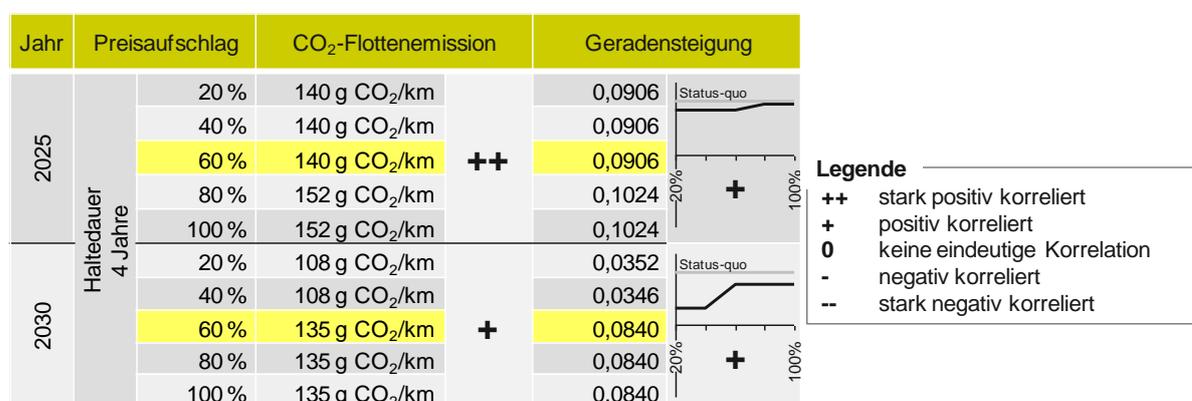


Abb. 6-22: Sensitivität auf veränderten Preisauflschlag bei LNF

6.5.5.2 Sensitivität auf Änderungen der PHEV/REEV-Dimensionierung

Hybride Technologiepakete und PHEV-Technologiepakete würden im Trendszenario bis 2030 nur von Kunden der höheren Fahrzeugsegmente erworben, während sie für Kunden der Kleinwagensegmente weiterhin nicht die wirtschaftlichste Alternative darstellen würden. Als Folge würden in höheren Fahrzeugsegmenten im Markt durchschnittlich höhere CO₂-Emissionsminderungen realisiert, wodurch sich eine Abflachung der entsprechenden Geradensteigung einstellen würde.

Die bisherigen Betrachtungen beruhen auf der kosten- und potenzielseitigen Quantifizierung der Fahrzeuge im SEG-1 als REEV mit 80 km rein elektrischer Reichweite, im SEG-2 und SEG-3 hingegen als PHEV mit 40 km rein elektrischer Reichweite. Bei einer Reduzierung der rein elektrischen Reichweite auf 40 km würde der Endkundenlistenpreis der entsprechenden REEV/PHEV-Technologiepakete in diesem Segment sinken. Somit könnte für einige Endkundengruppen trotz des aufgrund einer kleineren rein elektrischen Reichweite etwas geringeren Potenzials zur Kraftstoffeinsparung die Investition in die Technologiepakete wirtschaftlicher werden. In Folge der kleineren Dimensionierung sinkt der Herstellkostenanstieg

zur Implementierung eines PHEV in das entsprechende Referenzfahrzeug im Pkw SEG-1 mit Ottomotor im Jahr 2020 von 7.650 € auf 4.200 €. Durch Lerneffekte im Betrachtungszeitraum bis 2030 beträgt der Herstellkostenanstieg bei einem PHEV mit 40 km rein elektrischer Reichweite im Trendszenario schließlich 2.940 € anstelle von 5.320 € bei einem Fahrzeug mit 80 km rein elektrischer Reichweite.

Als Ergebnis der Sensitivätsberechnungen ergibt sich jedoch, dass auch die Ausführung von Pkw SEG-1 als PHEV mit lediglich 40 km rein elektrischer Reichweite diese Antriebskonzepte für die Kundengruppe im Trendszenario über den gesamten Betrachtungszeitraum weiterhin nicht die wirtschaftlichste Alternative darstellen. Analoge Ergebnisse zeigen sich im progressiven Szenario. Hier stellen konventionelle Technologiepakete sowie Technologiepakete mit Mild- und Full-Hybrid für die Fahrzeugendkunden die wirtschaftlichste Alternative dar, nicht jedoch PHEV/REEV-Technologiepakete.

6.5.5.3 Sensitivität auf Änderungen des Amortisationszeitraums

Im Zuge der Modellierung des Kundenverhaltens wird unter Bezug auf die gängige Vorgehensweise festgelegt, dass die gewerblichen und privaten Kunden unabhängig von ihrer Mehrpreisbereitschaft ihre Investitionsentscheidungen stets auf Basis eines vierjährigen Betrachtungszeitraumes fällen. Mit zunehmendem Betrachtungszeitraum amortisieren sich mehr fortschrittliche Technologiepakete mit höheren Anschaffungskosten – die Folge wäre eine weitere Senkung der CO₂-Flottenemission, vgl. Abb. 6-23 für Pkw und Abb. 6-24 für LNF. Bei Pkw würde sich z.B. im Standardfall im Jahr 2025 eine Flottenemission von 96 g CO₂/km einstellen. Erweitern die Kunden ihren Betrachtungshorizont um ein weiteres Jahr, kommt es zu einer signifikant stärkeren Einführung von hybriden TPs und PHEV-TPs in den Markt. Infolgedessen würden die Flottenemission auf 78 g CO₂/km zurückgehen. Im Jahr 2030 ist schon im Standardfall die Pkw-Flotte teilweise mit entsprechenden TPs ausgerüstet, so dass eine weitere Ausdehnung des Betrachtungszeitraums weniger stark senkend auf die CO₂-Flottenemissionen wirkt.

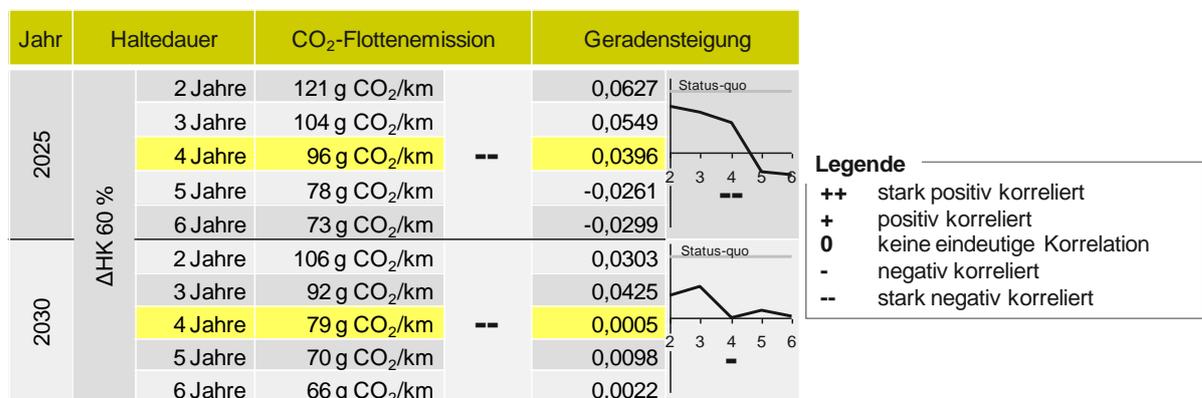


Abb. 6-23: Sensitivität auf veränderte Betrachtungsdauer bei Pkw (Trendszenario)

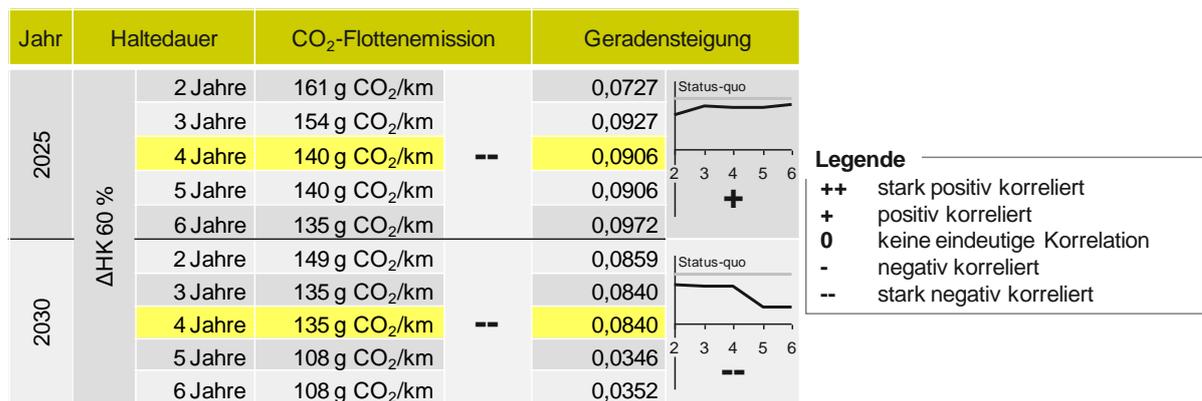


Abb. 6-24: Sensitivität auf veränderte Betrachtungsdauer bei LNF (Trendszenario)

Aus den Sensitivitätsanalysen wird weiterhin die Beobachtung bestärkt, dass die Entwicklung der CO₂-Flottenemissionen und die Steigung der entsprechenden Regressionsgerade tendenziell positiv miteinander korrelieren. Mit fallenden CO₂-Emissionswerten sollte daher die Grenzwertkurve zunehmend abgeflacht werden. Diese Abflachung betrifft Pkw bedeutend stärker als LNF, da bei ersteren der Einsatz von PHEV die CO₂-Emissionswerte überproportional absenkt.

6.6 Zielerreichungskosten für alternative CO₂-Grenzwertkurven

Im Zuge der Weiterentwicklung der CO₂-Gesetzgebung liegt eine Zielsetzung darin, eine ausgeglichene monetäre Minderungslastenverteilung für Hersteller mit Schwerpunkten in allen Fahrzeugsegmenten zu gewährleisten. Im Folgenden wird daher untersucht, welche Minderungslasten den Herstellern zur Erreichung alternativ diskutierter CO₂-Grenzwertkurven entstehen bzw. inwiefern durch eine entsprechende Wahl der Grenzwertkurve eine gleichmäßige Lastenverteilung erreicht werden kann.

6.6.1 Definition der Zielerreichungskosten

Die Implementierung fortschrittlicher Technologiepakete zur Senkung der CO₂-Emissionen der Referenzfahrzeuge führt in jedem Fall zu einer Erhöhung der Herstellkosten des Fahrzeuges. Für eine dauerhaft profitable Unternehmensführung muss ein Fahrzeughersteller ihm entstehende Mehrkosten an die Kunden weitergeben können. Wie in Kapitel 6.5 beschrieben, ist es für private und gewerbliche Endkunden von Pkw und LNF aufgrund der erzielbaren Kraftstoffeinsparungen in der Tat wirtschaftlich, in größerem Umfang fortschrittliche Technologiepakete zu erwerben, was zu einer deutlichen Reduktion der CO₂-Flottenemissionen führt, z.B. auf 96 g CO₂/km bei Pkw im Jahr 2025 im Trendszenario. Sind Fahrzeughersteller dazu angehalten, z.B. durch strengere legislative CO₂-Zielwertvorgaben, weitere Technologieumfänge in die Fahrzeuge zu integrieren, amortisieren sich die resultierenden Mehrkosten für die Fahrzeugendkunden nicht mehr. Weil die Kunden nicht mehr dazu bereit sind, diese Mehrkosten zu tragen, kann sie der Fahrzeughersteller nicht mehr vollständig weitergeben – ihm entstehen ungedeckte zusätzliche Herstellkosten in Höhe des

Differenzbetrages zu den zusätzlich zu implementierenden, aber für den Kunden nicht mehr wirtschaftlichen Technologien. Diese Mehrkosten werden im Rahmen der folgenden Analysen als zusätzliche Kosten der Zielerreichung betrachtet, wobei die Angabe der Größe stets als Durchschnittswert pro Fahrzeug und Hersteller erfolgt.

6.6.2 Zielerreichungskosten für Pkw – Abstrahierte Fahrzeughersteller

Die abstrahierten Fahrzeughersteller setzen ihr Produktportfolio aus den bislang einzeln betrachteten Fahrzeugsegmenten zusammen. Bei der Erfüllung vorgegebener Grenzwertkurven müssen diese nicht zwingend mit jedem Fahrzeugsegment die CO₂-Zielwerte erfüllen, sondern lediglich im Durchschnitt ihrer Flotte. In begrenztem Maße ergeben sich daher je nach Kostensituation in den einzelnen Segmenten für die Fahrzeughersteller strategische Möglichkeiten zur kostenoptimalen Erreichung der CO₂-Grenzwertkurve. Unter Beachtung dieser Optimierungsmöglichkeit würden sich im Trendszenario die in Abb. 6-25 gezeigten zusätzlichen Zielerreichungskosten pro Fahrzeug für die abstrahierten Hersteller einstellen.

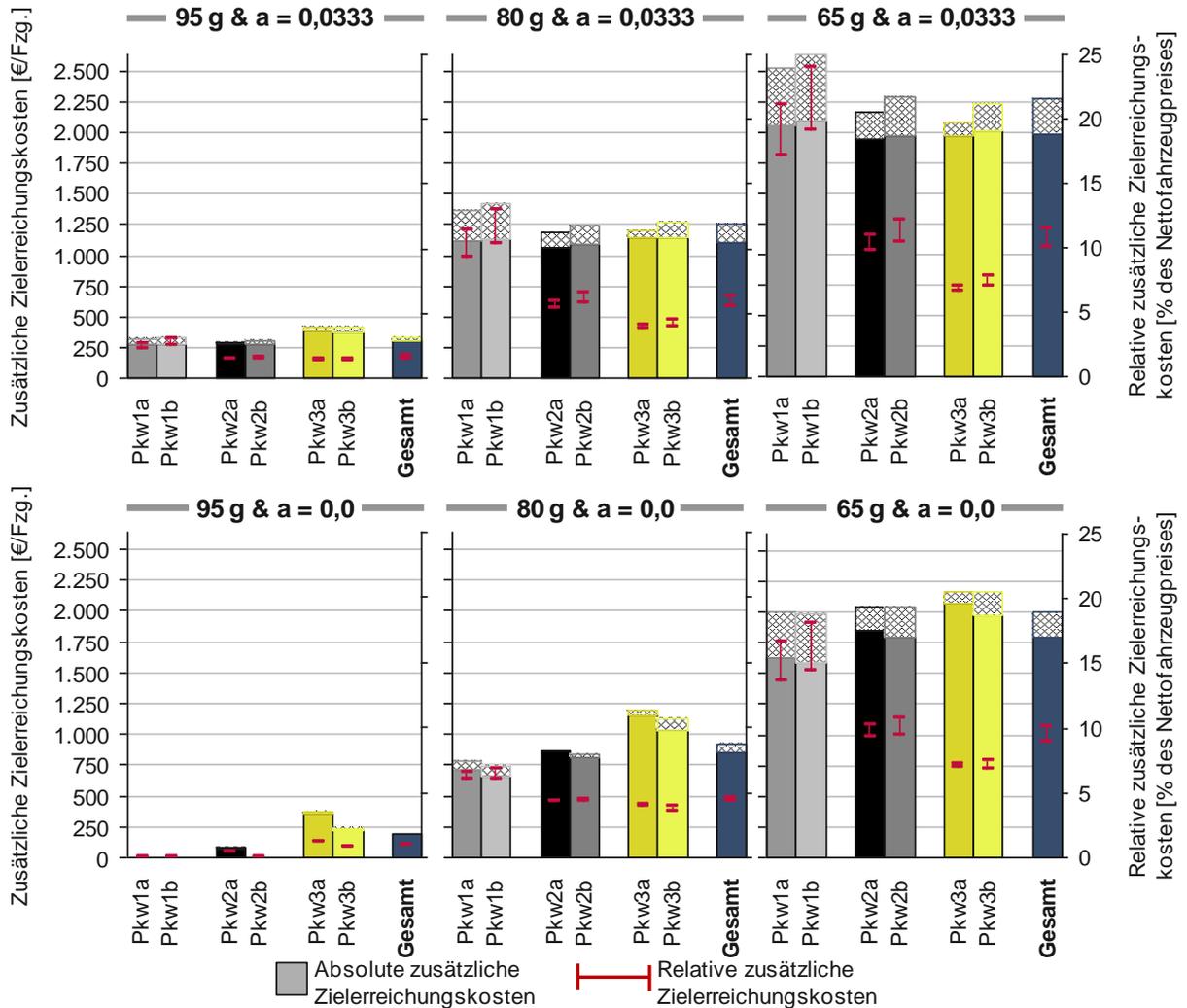


Abb. 6-25: Zusätzliche Zielerreichungskosten für Pkw-Hersteller im Jahr 2025 bei einer Geradensteigung von 0,0333 bzw. 0,0 im Trendszenario

Die Zielerreichungskosten werden hierbei grundsätzlich auf Herstellkostenniveau angegeben, wobei die tatsächlichen Kosten für die Fahrzeughersteller noch höher liegen können, da z.B. Rückstellungen für Garantien/Kulanz für komplexere Technologien, die tatsächlich in den Markt gebracht würden, erstellt werden müssten. Gleichzeitig werden in dieser Betrachtung keine Marge oder Vertriebskosten für die weiteren Technologieumfänge berücksichtigt, so dass die durchschnittliche Rendite der Unternehmen gemindert würde. Die Angabe der zusätzlichen Kosten erfolgt dabei, im Hinblick auf die Sensitivitätsanalysen in Kapitel 6.5.5.2, hinsichtlich der unterschiedlich dimensionierten PHEV-Fahrzeuge bei Pkw SEG-1 in einem Intervall. Die obere Grenze des Balkens entspricht der im Referenzfall vorgenommenen Dimensionierung mit 80 km rein elektrischer Reichweite, die untere Grenze entspricht der Kostensituation bei einer Halbierung der rein elektrischen Reichweite auf 40 km in diesem Segment. Zur Verdeutlichung der abweichenden monetären Belastung für Hersteller mit Schwerpunkten in unterschiedlichen Segmenten erfolgt die Angabe zudem als Prozentsatz des durchschnittlichen Netto-Fahrzeugneupreises der abstrahierten Hersteller, vgl. Abb. 6-25.

Bei der Betrachtung der Belastung mit einer angenommenen Geradensteigung von 0,0333 und der kleineren PHEV/REEV Dimensionierung würden auf alle betrachteten Hersteller ähnliche hohe Kosten zur Zielerreichung zukommen. Würde jedoch bis zum Jahr 2025 die Geradensteigung auf Null gesenkt werden, so würden Hersteller mit Schwerpunkt im Oberklassesegment erwartungsgemäß mit höheren absoluten Kosten stärker belastet als Kleinwagenhersteller. Unabhängig von der Geradensteigung zeigt sich jedoch, dass insbesondere für Hersteller mit Schwerpunkten im Kleinst- und Kleinwagensegment (Pkw1a/b) die zusätzlichen Herstellkosten einen signifikant höheren Anteil am üblichen durchschnittlichen Fahrzeugpreis bilden als bei Herstellern im Premiumsegment, z.B. Pkw3a/b. So würde ein 65 g-Grenzwert (Geradensteigung 0,0) im Trendszenario beim abstrahierten Hersteller Pkw1a/b zu zusätzlichen Zielerreichungskosten in Höhe von etwa 16 % des durchschnittlichen Fahrzeugnettopreises führen, während dieser Anteil bei den Premiumherstellern Pkw3a/b mit etwa 7 % bedeutend kleiner ausfällt. Trotz eines gewichtsunabhängig definierten CO₂-Grenzwertes wäre es im Rahmen dieses Szenarios nicht ohne begleitende Regelungen möglich, eine gleichmäßige relative Verteilung der monetären Minderungslasten zu erreichen, wohingegen eine gleichmäßige absolute Verteilung näherungsweise erreicht werden kann. Tendenziell stellen sich in den weiteren Szenarien (konservativ, progressiv) ähnliche Ergebnisse ein, wenn auch auf insgesamt abweichendem Kostenniveau.

Im Jahr 2030 ergeben sich für die Fahrzeughersteller im Trendszenario zur Erreichung eines 95 g-Zielwertes oder eines 80 g-Zielwertes keine zusätzlichen Kosten zur Zielerreichung, da ihre Kunden jeweils dazu bereit sind, aus wirtschaftlichen Überlegungen einen Kaufpreisanstieg zur Implementierung der Technologiepakete zu übernehmen, vgl. Abb. 6-26.

Ein CO₂-Zielwert von 65 g CO₂/km im Jahr 2030 bedeutete dagegen für alle Hersteller einen Herstellkostenanstieg im Verhältnis zum durchschnittlichen Fahrzeugneupreis von ca. 4 %. Die Erreichung wesentlich niedriger CO₂-Flottenemissionswerte ist jedoch auch bis 2030 mit einem bedeutenden Anstieg der zusätzlichen Zielerreichungskosten verbunden, welcher ins-

besondere Kleinst- und Kleinwagenhersteller (Pkw1a/b) anteilig stärker belastet als Premiumhersteller.

Es zeigt sich, dass die kostenoptimale Technologiestrategie herstellerübergreifend den frühen Einsatz von PHEV/REEV-Technologiepaketen beinhaltet. Dieser Effekt beruht im Wesentlichen auf der Tatsache, dass ein PHEV mit 25 km rein elektrischer Reichweite nominell nur die Hälfte an CO₂ emittiert im Vergleich zu einem Fahrzeug ohne elektrische Reichweite, wodurch der Einsatz von PHEV/REEV in der Regel für die Fahrzeughersteller kosteneffizienter ist als der Einsatz von Mild- oder Full-Hybriden. Diese Technologiestrategie und das Kostenverhältnis sind jedoch elementar abhängig von der Berechnungsvorschrift der ECE R101, so dass sich bei einer zukünftig möglichen Anpassung oder Ablösung dieser Norm substantielle Verschiebungen in der Herstellerstrategie ergeben können.

Für deutsche Fahrzeughersteller ergeben sich die Auswirkungen alternativer zukünftiger Grenzwertkurven aus ihrer Positionierung im Markt. Während Volumenhersteller nahezu dem gesamteuropäischen Marktdurchschnitt entsprechen und dahingehend eine durchschnittliche Belastung erfahren, haben Hersteller mit Schwerpunkt im Premiumsegment erhöhte absolute Minderungslasten zu tragen. In einer relativen Betrachtung zum Fahrzeugneupreis hingegen findet gegenüber Kleinwagenhersteller eine Minderung der Lasten statt.

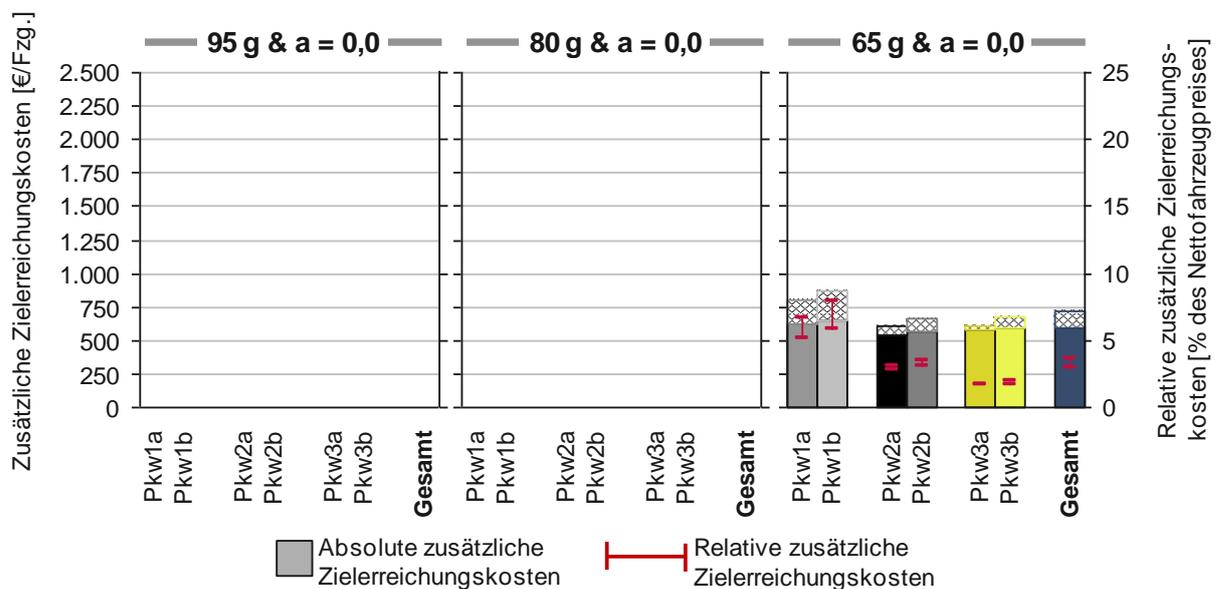


Abb. 6-26: Zusätzliche Zielerreichungskosten für Pkw-Hersteller im Jahr 2030 bei einer Geradensteigung von 0,0 im Trendszenario

6.6.3 Zielerreichungskosten für LNF – Abstrahierte Fahrzeughersteller

Unter Beibehaltung der derzeit festgelegten Geradensteigung von 0,093 kann im Jahr 2025 im Trendszenario aufgrund der Kundenentscheidungen ein durchschnittlicher CO₂-Flottenzielwert von 145 g ohne zusätzliche Zielerreichungskosten für die Fahrzeughersteller erreicht werden, vgl. Abb. 6-27.

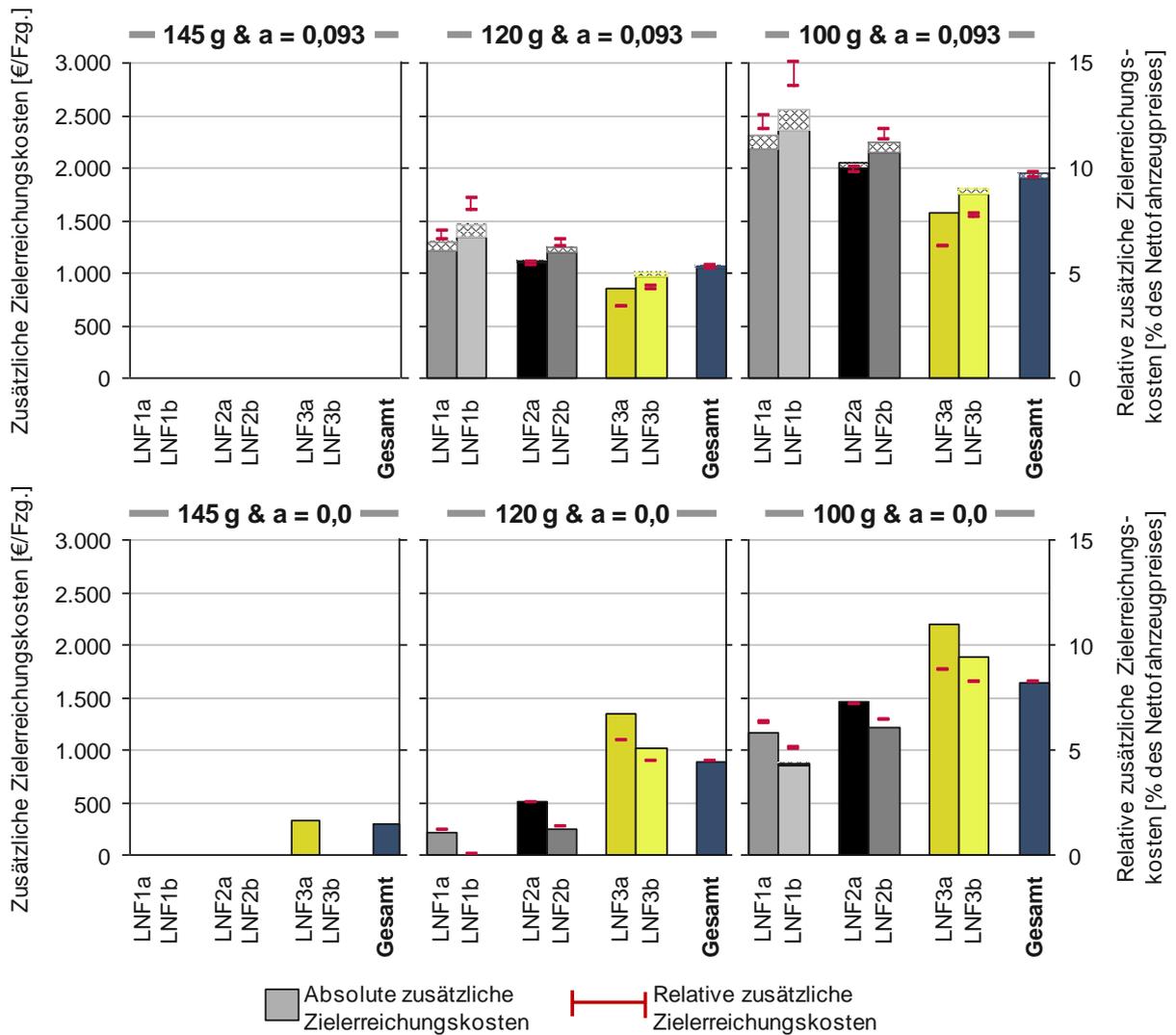


Abb. 6-27: Zusätzliche Herstellkosten zur Zielerreichung bei LNF im Jahr 2025 bei unterschiedlichen Geradensteigungen im Trendszenario

Wird jedoch ein niedrigerer Flottenemissionswert angestrebt, ergeben sich zusätzliche, nicht an den Kunden weiterzugebende Mehrkosten für die LNF-Hersteller, z.B. zwischen ungefähr 3,5 und 8,5 % gemessen am durchschnittlichen Netto-Fahrzeugneupreis. Bei gleicher Geradensteigung stellen sich hierbei prozentual höhere monetäre Minderungslasten für Hersteller mit Schwerpunkt im Segment der leichten Transporter (LNF1a/b) als für Hersteller mit vorwiegend schweren Fahrzeugen. Dieses Verhältnis lässt sich umkehren, wenn eine sehr flache Geradensteigung, im Extremfall 0,0, gewählt wird. In diesem Fall entstehen den Herstellern LNF3a/b absolut und relativ höhere Herstellkosten. Die Geradensteigung stellt also einen wesentlichen Stellhebel dar, für einen gewünschten durchschnittlichen CO₂-Flottenemissionswert eine gleichmäßige Lastenverteilung zwischen Fahrzeugherstellern mit Schwerpunkten in unterschiedlichen Segmenten zu erreichen. Auch bei LNF bilden PHEV-Technologiepakete in den modellierten Technologiestrategien der Hersteller einen entscheidenden Baustein zur Erreichung strengerer CO₂-Grenzwerte.

6.7 Zwischenfazit

In den Basisjahren betragen die CO₂-Flottenemissionen bei Pkw 141 g CO₂/km (2010), bei LNF 187 g CO₂/km (2011). Davon ausgehend sinken die CO₂-Flottenemissionen im Zeitverlauf auf Basis der Investitionsentscheidungen von privaten und gewerblichen Endkunden. Im Trendszenario werden bei Pkw bis 2025 überwiegend konventionelle Technologien eingesetzt, so dass bei einer konstanten Marktverteilung Flottenemissionen in Höhe von 99 g CO₂/km (-32 %) wirtschaftlich würden. Unter Berücksichtigung des antizipierten Marktstruktureffekts mit einem Trend hin zu Klein- und Kleinwagen würden CO₂-Flottenemissionen in Höhe von 96 g CO₂/km im Trendszenario wirtschaftlich, was ungefähr dem legislativen Zielwert für Ende 2020 entspricht. Werden die Berechnungsergebnisse bezüglich der einzelnen Pkw-Segmente auf abstrahierte Kleinwagen-, Volumen- und Premiumhersteller projiziert, zeigt sich, dass in diesem Szenario bei einer Geradensteigung von 0,0333 und einem Grenzwert in dieser Höhe die betrachteten Referenzhersteller ihre individuellen Flottenzielwerte erreichen könnten, weil ihre Kunden aufgrund der möglichen Kraftstoffkostensparnisse bereit wären, die mit der Zielerreichung verbundenen Fahrzeugmerkmale zu tragen. Weitergehende Minderungen sind zudem durch den Einsatz von Ökoinnovationen mit bis zu 7 g CO₂/km zu erreichen. Für den Zeitraum ab 2022 sind derzeit keine Supercredit-Regelungen spezifiziert.

Bis zum Jahr 2030 setzen sich im Trendszenario insbesondere bei benzinbetriebenen Fahrzeugen in höheren Segmenten Hybrid- und PHEV-Technologiepakete durch, da diese unter den gegebenen Rahmenbedingungen für viele Kundengruppen eine wirtschaftliche Alternative darstellen. Die Flottenemissionen würden auf 81 g CO₂/km absinken (-44 %), bzw. 79 g CO₂/km inklusive Marktstruktureffekt. Im Zuge der vermehrten Hybridisierung der höheren Segmente und insbesondere des Einsatzes von PHEV im SEG-3 entkoppelt sich der CO₂-Emissionswert zunehmend von der Fahrzeugmasse. Bis zum Jahr 2030 wäre daher im Trendszenario unter den gegebenen Rahmenbedingungen eine nahezu masseunabhängige Definition des Grenzwertes ($a = 0,0$) anzustreben, vorausgesetzt, die CO₂-Emissionen von PHEV werden weiterhin nach der aktuell gültigen Norm ermittelt.

Bei LNF werden im gesamten Betrachtungszeitraum bis 2030 im Trendszenario nur konventionelle Technologiepakete eingesetzt. Bis zum Jahr 2025 würden die CO₂-Flottenemissionen mit einer gleichbleibenden Marktzusammensetzung und gleichbleibendem Kraftstoffmix unter den gegebenen Rahmenbedingungen des Trendszenarios um 24 % auf 143 g CO₂/km sinken, bis zum Jahr 2030 weiter auf 140 g CO₂/km. Unter Berücksichtigung eines erhöhten Anteils von Gasfahrzeugen und BEV im Projektionszeitraum ergeben sich in diesem Szenario 140 g CO₂/km für das Jahr 2025 und 135 g CO₂/km für das Jahr 2030. Im Gegensatz zu Pkw bleibt aufgrund des gleichmäßigen Einsatzes von konventionellen Technologiepaketen der starke Zusammenhang zwischen Masse und CO₂-Emissionen erhalten. So wäre 2025 und 2030 eine Geradensteigung von etwa 0,09 abzuleiten. Der derzeit gültige gesetzliche Wert von 0,093 könnte demnach beibehalten werden.

Eine Absenkung der CO₂-Flottenemissionen bei Pkw, z.B. aufgrund strengerer legislativer Zielwertvorgaben, über jene Schwelle hinaus, die für Fahrzeugenkunden aufgrund erzielbarer Kraftstoffeinsparungen wirtschaftlich wird, resultiert aus Sicht der Fahrzeughersteller in zusätzlichen Kosten zur Zielerreichung. Sie entstehen, da zur Erreichung der Zielwerte fortschrittlichere Technologiepakete in die Fahrzeuge zu integrieren sind und entsprechende Mehrkosten nicht an die Fahrzeugenkunden weitergeben werden können. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abb. 6-28.

Die Fahrzeugenkunden fragen Technologiepakete zum Endkundenlistenpreis nach, welcher im Rahmen der Modellierung durch die Bestandteile Mehrwertsteuer, Vertriebskosten, Rückstellungen und Marge ca. 60 % über den reinen Herstellkosten liegt. Im Trendszenario sind Pkw-Fahrzeugenkunden dazu bereit, im Durchschnitt in innovative Technologiepakete mit einem Wert von ca. 1.600 € Herstellkosten pro Fahrzeug zu investieren, da sie hierdurch entsprechend hohe Kraftstoffeinsparungen während der Haltedauer erzielen können. Aufgrund weiter steigender Kraftstoffpreise steigt die Investitionsbereitschaft bis zum Jahr 2030 auf ein Äquivalent von etwa 2.300 € Herstellkosten je Fahrzeug an. In der folgenden Abb. 6-28 werden die verschiedenen entwickelten Marktszenarien mit den korrespondierenden Technologiekosten auf Herstellkostenebene den verschiedenen Zielwertvorschlägen für die Jahre 2025 und 2030 gegenübergestellt.

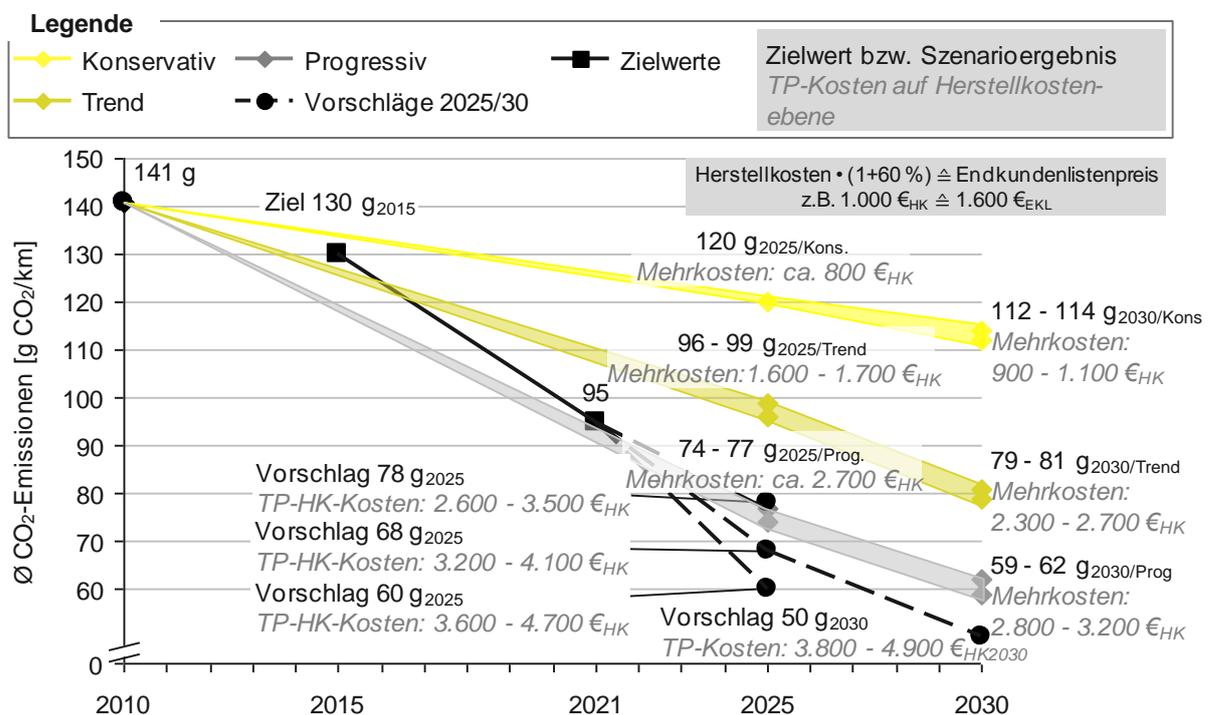


Abb. 6-28: Marktszenarien mit und ohne Marktstruktureffekt und Übersicht zu Zielwertvorschlägen mit resultierenden Technologiekosten auf Herstellkostenebene

Zur Erfüllung eines sehr niedrigen CO₂-Zielwerts in Höhe von 68 g CO₂/km im Jahr 2025 wären Technologiepakete zu implementieren, welche je nach Szenario einen Anstieg der

Herstellkosten je Fahrzeug um mindestens 3.200 € bis 4.100 € bewirken würden. Aufgrund der Wirtschaftlichkeitserwägungen wären die Endkunden nicht bereit, diese Mehrkosten in voller Höhe zu tragen. Der verbleibende Unterschiedsbetrag in Höhe von 500 € (Progressives Szenario), ca. 2.200 € (Trend Szenario) bis 3.300 € (Konservatives Szenario) wäre demnach von den Herstellern zu tragen, damit der Kunde sich dennoch für die emissionsärmere Antriebsart entscheidet. Zur Erreichung niedrigerer oder höherer CO₂-Zielwerte verbleibt ein entsprechend größerer bzw. kleinerer Residualbetrag für den jeweiligen Fahrzeughersteller.

Die genannten zusätzlichen Zielerreichungskosten für die Fahrzeughersteller sind hierbei grundsätzlich auf Herstellkostenniveau angegeben, wobei die tatsächlichen Kosten für die Fahrzeughersteller noch höher liegen können, da z.B. Rückstellungen für Garantien/Kulanz für komplexere Technologien, die tatsächlich in den Markt gebracht würden, erstellt werden müssten. Gleichzeitig werden in dieser Betrachtung keine Marge oder Vertriebskosten für die weiteren Technologieumfänge berücksichtigt, so dass die durchschnittliche Rendite der Unternehmen gemindert würde.

Generell stellt die Steigung der Grenzwertkurve in diesem Zusammenhang eine Möglichkeit dar, die monetäre Lastenverteilung zwischen Herstellern mit Schwerpunkten in unterschiedlichen Fahrzeugsegmenten zu beeinflussen. Absolut entstehen bei flachen Geradensteigungen Herstellern mit Schwerpunkten in höheren Fahrzeugsegmenten höhere zusätzliche Kosten zur Zielerreichung. Bezogen auf den durchschnittlichen Netto-Fahrzeugneupreis ergeben sich hingegen bei Pkw im Trendszenario über den gesamten Betrachtungszeitraum relativ höhere Mehrkosten für Kleinst- und Kleinwagenhersteller, wenn ein vollständig masseunabhängiger CO₂-Grenzwert definiert würde. Bei leichten Nutzfahrzeugen ist im Betrachtungsrahmen zukünftiger CO₂-Grenzwerte auch eine entsprechende Lastenumverteilung über die Geradensteigung einstellbar. Die Analyse optimaler Herstellerstrategien zeigt, dass sehr strenge CO₂-Grenzwerte in vielen Fällen am effektivsten durch den Einsatz von PHEV-TP zu erreichen sind.

Für deutsche Fahrzeughersteller ergeben sich die Auswirkungen alternativer zukünftiger Grenzwertkurven aus ihrer Positionierung im Markt. Während Volumenhersteller nahezu dem gesamteuropäischen Marktdurchschnitt entsprechen und dahingehend eine durchschnittliche Belastung erfahren, haben Hersteller mit Schwerpunkt im Premiumsegment erhöhte absolute Minderungslasten zu tragen. In einer relativen Betrachtung zum Fahrzeugneupreis hingegen findet gegenüber Kleinwagenhersteller eine geringere finanzielle Belastung statt.

Die gesamten Berechnungsergebnisse, sowohl die Größenordnung der erreichbaren CO₂-Flottenemissionen als auch die zu empfehlende Geradensteigung, hängen im Wesentlichen davon ab, ob und inwiefern hybride Technologien (Mild-, Full- und Plug-in-Hybride) für die privaten und gewerblichen Endkunden wirtschaftlich werden. Darauf haben zentrale Modellierungsannahmen einen wesentlichen Einfluss, wie die durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen. So besteht ein deutlicher Zusammenhang zu dem von den Kunden geforderten

Amortisationszeitraum. Bereits eine Erweiterung dieses Betrachtungszeitraumes um ein Jahr bewirkt, dass für deutlich größere Kundengruppen im Trendszenario bereits im Jahr 2025 hybride Technologien wirtschaftlich würden. Ähnliche Abhängigkeiten bestehen zur Höhe der Endkundenlistenpreise der definierten Technologiepakete. Die Berechnungsergebnisse sind demnach stets im Kontext mit den eingeführten Modellierungsannahmen zu interpretieren.

Ähnlich starke Abhängigkeiten der Berechnungsergebnisse bestehen zu der Vorgehensweise zur Quantifizierung der CO₂-Emissionen von PHEV. In der gegenwärtigen Gesetzgebung führt das Berechnungsverfahren zu vergleichsweise niedrigen CO₂-Emissionen von Fahrzeugen mit derartigem Antriebsstrang. In den durchgeführten Berechnungen schlägt sich dies in einer abnehmenden statistischen Abhängigkeit von CO₂-Emissionen und Fahrzeugmasse nieder, was langfristig zur Ableitung nahezu masseunabhängig definierter CO₂-Grenzwerte führt. Dieses Ergebnis ist jedoch streng in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Quantifizierung der CO₂-Emissionen von PHEV zu verstehen. Auf eine zukünftige Änderung des Verfahrens, z.B. im Zuge der WLTP-Einführung, sind die Berechnungsergebnisse nicht unmittelbar zu übertragen.

7 Ansätze für eine Novellierung der CO₂-Gesetzgebung in der EU

Die gegenwärtige CO₂-Regulierung für Pkw und LNF beruht im Wesentlichen auf der masseabhängigen Definition eines herstellerspezifischen CO₂-Zielwertes in Kombination mit umfangreich und sachlich beschränkten Anreiz- und Flexibilisierungsmechanismen, wie Supercredits oder Ökoinnovationen. In diesem Kapitel wird untersucht, welche Auswirkungen mögliche Veränderungen der geltenden CO₂-Gesetzgebung haben würden. Dabei wird insbesondere analysiert, durch welche Änderungen sich die Wettbewerbsneutralität verbessern oder die Wirtschaftlichkeit und Kosteneffizienz der Zielerreichung steigern ließen.

Zunächst werden hierzu in Kapitel 7.1 alternative Nutzwertparameter für die CO₂-Regulierung als Substitut für den derzeit verwendeten Masseparameter diskutiert. Anschließend wird in Kapitel 7.2 die Wirkung existierender und möglicher weiterer Flexibilisierungsmaßnahmen analysiert, wobei auch Maßnahmen aus einem internationalen Vergleich in Betracht gezogen werden.

7.1 Parametervariationen

Obwohl derzeit der Bezugsparameter „Masse“ als differenzierender Nutzwertparameter in der EU in der CO₂-Gesetzgebung sowohl bei Pkw als auch bei LNF etabliert ist, stand dieser gerade zu Beginn des CO₂-Gesetzgebungsprozesses in der Diskussion [EUR07]. Für die Zukunft wurde ausdrücklich die Möglichkeit der Verwendung von abweichenden Nutzwertparametern, z.B. der Fahrzeugstandfläche, festgehalten [EUR09]. Darauf aufbauend sollen in diesem Kapitel die Anwendbarkeit und mögliche Effekte alternativer Nutzwertparameter in der CO₂-Gesetzgebung bei Pkw und LNF diskutiert werden.

7.1.1 Anforderungen

Geeignete Alternativen zur derzeitigen Nutzwertparametrisierung auf Basis der Fahrzeugmasse sollten einer Reihe von Anforderungen genügen, vgl. Erwägungsgrund Nr. 12 der Richtlinie 443/2009 [EUR09].

- **Korrelation:** Die spezifischen CO₂-Emissionen der europäischen Pkw bzw. LNF sollen mit dem Nutzwertparameter korrelieren und dabei ein hohes Bestimmtheitsmaß aufweisen. Durch eine hohe Korrelation kann gewährleistet werden, dass eine auf diesem Nutzwertparameter aufgebaute CO₂-Regulierung grundsätzlich eine gleichmäßige und damit wettbewerbsneutrale Minderungslastenverteilung auf Hersteller mit Schwerpunkten in allen Segmenten und Fahrzeugkonzepten ermöglicht.
- **Robustheit:** Die CO₂-Regulierung auf Basis des gewählten Nutzwertparameters sollte keine unerwünschten Fehlanreize in der Fahrzeugentwicklung setzen und auch dann weiterhin eine wettbewerbsneutrale Grenzwertdefinition ermöglichen, wenn sich Marktverhältnisse verschieben, z.B. zwischen Fahrzeugsegmenten oder Kraftstoffarten oder sich technologische Trends abzeichnen, z.B. Downsizing von Motoren oder die Elektrifizierung des Antriebstrangs.

- **Datenverfügbarkeit und –objektivität:** Die Datenerhebung im Rahmen der Typzulassung wird derzeit in Richtlinie 2007/46/EG geregelt. Aus Richtlinie 443/2009 (Pkw) bzw. 510/2011 (LNF) ergibt sich, welche technischen Fahrzeugdaten derzeit im Rahmen der CO₂-Gesetzgebung erhoben werden.

7.1.2 Diskussion alternativer Parameter

Die Fahrzeugstandfläche stellt durch ihre Anwendung in der CO₂-Regulierung in den USA die in der Praxis bedeutendste Alternative zur massebasierten CO₂-Regulierung dar. Weitere alternative Nutzwertparameter lassen sich ferner auf Basis von Motor-Kenngrößen wie Fahrzeugleistung oder Hubraum bilden. Theoretisch könnte die Nutzwertparametrisierung auch auf Basis der Personentransportkapazität über die Anzahl der Sitzplätze oder der Gütertransportkapazität auf Basis der zulässigen Zuladung oder des Koffer- bzw. Laderaumvolumens erfolgen, vgl. Abb. 7-1.

Die Korrelation der CO₂-Emissionen der Fahrzeuge mit dem Nutzwertparameter ist die zentrale Anforderung zur prinzipiellen Ermöglichung einer wettbewerbsneutralen CO₂-Regulierung. Statistisch kann die Korrelation über das Bestimmtheitsmaß beurteilt werden. Es gibt in diesem Zusammenhang an, zu welchem Anteil die Varianz des durchschnittlichen CO₂-Ausstoßes der Fahrzeughersteller auf verschiedenen hohe quantitative Ausprägungen des Nutzwertparameters zurückzuführen sind. Bezüglich des Bestimmtheitsmaßes ist zu beachten, dass dessen Angabe im Rahmen dieser Studie gewichtet auf Ebene der Fahrzeughersteller erfolgt, um die Möglichkeit einer fairen Lastenverteilung zu eruieren. Ein abweichendes Bestimmtheitsmaß könnte sich hingegen dann ergeben, wenn dieses auf Basis von Einzelfahrzeugen oder aggregierten Segmenten ermittelt würde.

Die Fahrzeugmasse weist im Vergleich zur Fahrzeugstandfläche für die europäische Fahrzeugflotte grundsätzlich eine bessere Korrelation mit den CO₂-Emissionen auf, wenn auch die Situation von Herstellern mit Schwerpunkten in einzelnen Fahrzeugsegmenten, wie Geländewagen, Sportwagen oder Fahrzeugen der Luxusklasse, nicht adäquat abgebildet werden kann. Der Masse-Nutzwertparameter hat sich in der Vergangenheit als robust gegenüber unerwünschten fahrzeugtechnischen Entwicklungen erwiesen und ist somit ein grundsätzlich geeigneter Nutzwertparameter für die europäische CO₂-Regulierung.

Derzeit ist auf Basis motorbezogener Daten auch die Abbildung der CO₂-Emissionen jener Fahrzeughersteller besser möglich, welche durch die Fahrzeugmasse nicht adäquat zu erfassen sind. Dies zeigt sich in einem gesteigerten statistischen Bestimmtheitsmaß. Demgegenüber bestehen mit diesen Parametern Nachteile bei der Erfassung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. Während der Fahrzeughubraum keine Entsprechung bei Elektromotoren findet und zudem auch bei Verbrennungsmotoren durch den Trend zum Downsizing zunehmend an Unterscheidungskraft verliert, ist die Definition der Leistung bei Elektrofahrzeugen, auch im Hinblick auf die kombinierte Systemleistung bei Hybridfahrzeugen schwierig zu erfassen. So muss unter anderem zwischen Spitzen- und Dauerleistung unterschieden werden. Da zudem auch die Leistung bei Verbrennungsmotoren, z.B. durch höhere Ladedrücke,

technisch vergleichsweise einfach zu steigern ist und zunehmend unabhängig vom Verbrauch im Normzyklus wird, ist trotz der im Basisjahr 2010 bestehenden guten Korrelation eine langfristige Verwendung motortechnischer Nutzwertparameter kritisch zu beurteilen.

Für einzelne Fahrzeugsegmente ist die Nutzwertparametrisierung durch alternative Parameter, welche die Gütertransportkapazität (Kofferraum- oder Laderaumvolumen, zulässige Zuladung) quantifizieren, denkbar. Sie sind aber in der Regel nicht robust gegenüber einfachen Modifikationen der Fahrzeughersteller. Personenbezogene Transportkapazitäten, wie die Sitzplatzanzahl, weisen zudem keine ausreichende Korrelation mit den CO₂-Emissionen der Fahrzeuge auf. Ökonomische Parameter, wie der Fahrzeugneupreis, scheiden aus Gründen der mangelnden Datenverfügbarkeit und –objektivität aus.

Fahrzeugtyp	Parameter	Korrelation	Bestimmtheitsmaß R ²	R ² für Hersteller mit > 100.000 Zul. / a (Pkw) bzw. > 10.000 Zul./a (LNF)	Robustheit	Datenverfügbarkeit und –objektivität	Gesamtbewertung
M1 – Pkw	Fahrzeugmasse [kg]	+	0,68	0,75	0	+	+
	Fahrzeugstandfläche [m ²]	0	0,46	0,55	0	+	0
	Hubraum [cm ³]	+	0,74	0,67	-	+	0
	Leistung [kW]	+	0,73	0,66	-	+	0
	Anzahl Sitzplätze [-]	-	k.A.	k.A.	0	0	-
	Kofferraumvolumen [m ³]	-	k.A.	k.A.	-	-	-
	Fahrzeugpreis [€]	0	k.A.	k.A.	-	-	-
N1 – LNF	Fahrzeugmasse [kg]	++	0,81	0,81	0	+	+
	Fahrzeugstandfläche [m ²]	-	0,29	0,33	0	+	0
	Zulässige Zuladung [kg]	-	0,34	0,32	-	+	0
	Anzahl Sitzplätze [-]	-	k.A.	k.A.	0	0	-
	Laderaumvolumen [m ³]	0	k.A.	k.A.	-	-	-
	Fahrzeugpreis [€]	0	k.A.	k.A.	-	-	-

Abb. 7-1: Zusammenfassender Vergleich alternativer Nutzwertparameter (Datengrundlage Pkw: 2010, LNF: 2011)

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen kann daher die Beibehaltung der „Fahrzeugmasse“ als Nutzwertparameter für Pkw und LNF empfohlen werden. Derzeit ergibt sich kein dringender Bedarf zur Umstellung der CO₂-Regulierung auf die „Fahrzeugstandfläche“. Da sich die Vorteilhaftigkeit von Bezugsparametern jedoch immer aus den konkreten wirtschaftlichen und technologischen Rahmenbedingungen ergibt, kann eine entsprechende Umstellung des Nutzwertparameters gerade in der langfristigen Betrachtung dennoch relevant werden. Durch die potenziell zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges steigt die Fahrzeugmasse im Flottendurchschnitt tendenziell an, während die CO₂-Flottenemissionen deutlich sinken. Der auf Basis der aktuellen Zulassungsdaten ermittelte korrelative Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und Fahrzeugmasse kann so langfristig seine Gültigkeit verlieren und einen Wechsel des Nutzwertparameters, z.B. zur Fahrzeugstandfläche, sinnvoll erscheinen lassen.

7.2 Flexibilisierung der Zielerreichung

Ziel dieses Abschnitts ist es, mögliche Ansatzpunkte zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Kosteneffizienz der CO₂-Zielerreichung für Fahrzeughersteller und Kunden zu identifizieren und detailliert zu analysieren.

Im Einzelnen können folgende Ansatzpunkte identifiziert werden:

- Anrechnung von Ökoinnovationen;
- Mehrfache Anrechnung von besonders CO₂-emissionsarmen Fahrzeugen durch Supercredits;
- Zeitliche Flexibilisierung der Zielerreichung durch Banking-Borrowing-Systeme;
- Einbeziehung des Verkehrssektors in den bestehenden CO₂-Emissionszertifikatehandel inkl. Einführung eines intrasektoralen Emissionshandels als spezieller Ausprägungsform;
- Technologiespezifische Förderungen.

7.2.1 Ökoinnovationen

Unter Ökoinnovationen werden Technologien verstanden, welche im realen Fahrbetrieb eine Senkung der CO₂-Flottenemissionen bewirken, deren Wirksamkeit regelungsbedingt jedoch nicht im standardisierten Prüfverfahren (derzeit NEFZ) erfasst werden kann. Diese Technologien können nach geltender Rechtslage mit einem Gesamtbeitrag von bis zu 7 g CO₂/km auf die spezifischen Flottenemissionen der einzelnen Fahrzeughersteller angerechnet werden. Bislang wurden vier Technologien von der EU-Kommission als Ökoinnovationen zertifiziert und veröffentlicht.

Unter Einbeziehung von Ökoinnovation ergibt sich für die Fahrzeughersteller eine Aufweitung des technologischen Portfolios, welches zur Absenkung der CO₂-Flottenemissionen auf den herstellereigenen Zielwert eingesetzt werden kann. Ökoinnovationen sind dann Teil einer kostenoptimalen Technologiestrategie der Hersteller, wenn unter ihrer Verwendung auf die Implementierung kostenintensiverer Technologien mit CO₂-Reduktionspotenzial im

Normzyklus verzichtet werden kann. Damit kann grundsätzlich eine Erhöhung der Kosteneffizienz der Zielerreichung aus Sicht der Fahrzeughersteller erreicht werden.

Neben der EU existieren unter anderem auch in den CO₂-Gesetzgebungen der USA und China Mechanismen zur Anrechnung von Technologien zur CO₂-Reduktion, deren Wirksamkeit sich nicht in den jeweils verwendeten Testzyklen nachweisen lässt. Im internationalen Vergleich besteht in der US-Gesetzgebung das größte Potenzial zur Anrechnung dieser Technologien, vgl. Abb. 7-2. Während in der EU ein Hersteller seine Flottenemissionen durch Ökoinnovationen um bis zu 7 g CO₂/km mindern kann, kann sich ein Hersteller in den USA bis etwa 14,5 g CO₂/km bei Passenger Cars¹ und bis zu 18 g CO₂/km bei Light Trucks² anrechnen lassen. Bis zu 6 g CO₂/km können dabei durch Ökoinnovationen, für die bereits ein vordefinierter Katalog mit Technologien existiert, realisiert werden. Weitere bis zu 12 g CO₂/km können die Hersteller durch klimafreundliche Klimatechnologien bei Light Trucks erreichen, für Passenger Cars ist die Gutschrift auf höchstens 8,5 g CO₂/km begrenzt. Eine Gutschrift wird dabei sowohl für die Steigerung der Energieeffizienz der Klimaanlage als auch für die Senkung der Leckagerate und der Verwendung von Kältemittel mit geringerem Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) vergeben [EPA12]. Auch die chinesischen Standards erlauben die Anrechnung von Ökoinnovationen in Höhe von bis 12 g CO₂/km, vgl. Abb. 7-2. Die quantitative Anrechenbarkeit kann dabei international nicht direkt verglichen werden, da sich die Nachweis- und Zertifizierungsverfahren der potenziellen Ökoinnovationen stark unterscheiden und ihre Anrechenbarkeit in vielen Fällen auch der Höhe nach auf Einzelfallentscheidungen der entsprechenden Behörden beruht.

Würde die Anrechenbarkeit von Off-Cycle-Technologien in der europäischen CO₂-Regulierung ausgeweitet, würden hiervon wirksame Anreize zur Erschließung entsprechender Minderungspotenziale ausgehen und sich potenziell die Kosteneffizienz der CO₂-Flottenziel-erreichung für die europäischen Fahrzeughersteller verbessern. Eine Analyse der Kosteneffizienz muss jedoch stets individuell für jede Off-Cycle Technologie erfolgen. Eine trennscharfe Analyse der Kosteneffizienz gestaltet sich als Herausforderung, da einzelne Technologien, z.B. Lichtsysteme oder effizienzsteigernde Assistenzsysteme, von den Fahrzeugherstellern und Kunden maßgeblich aufgrund des Sicherheitsgewinns entwickelt und nachgefragt werden.

Durch die Anrechenbarkeit von Ökoinnovationen können von den Herstellern leicht erhöhte CO₂-Emissionen im eigentlichen Messzyklus akzeptiert werden. Da Ökoinnovationen zur tatsächlichen Reduktion der CO₂-Emissionen im realen Fahrbetrieb führen, können die CO₂-Gesamtziele dennoch erreicht werden. Aus ganzheitlicher Perspektive ist es für den mit der CO₂-Regulierung beabsichtigten Klimaschutzeffekt zudem wichtig, dass die CO₂-Emissionen insbesondere im realen Fahrbetrieb und nicht nur im Normzyklus reduziert werden. Daher können die hier diskutierten Ökoinnovationen ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten.

¹ US Passenger Cars entsprechen i.d.R. europäischen Pkw und SUV ohne Allradantrieb

² US Light Trucks entsprechen i.d.R. Pickups, Vans und SUV mit Allradantrieb

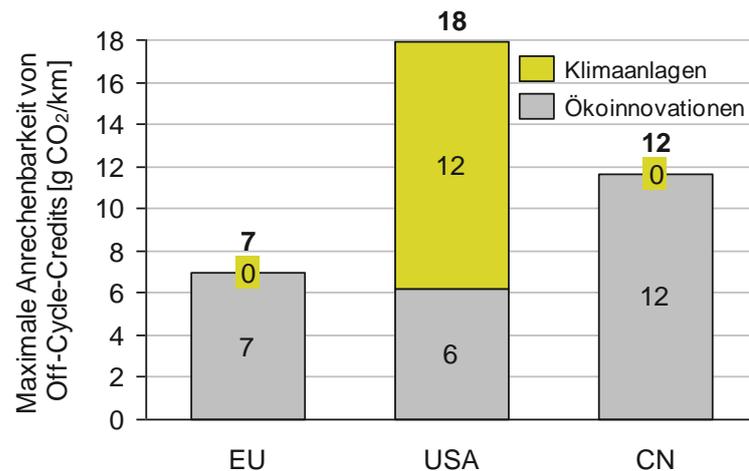


Abb. 7-2: Anrechenbarkeit von Off-Cycle-Technologien im internationalen Vergleich [EUR09] [EPA12] [SAC14]. Werte in den USA für Light Trucks.

7.2.2 Supercredit-Regelungen

Supercredit-Regelungen und Produktionsmultiplikatoren ermöglichen die mehrfache Anrechnung besonders verbrauchsgünstiger Fahrzeuge oder von Fahrzeugen mit bestimmten Antriebskonzepten, vgl. Kapitel 4.1.1.3. Bei der Berechnung der durchschnittlichen CO₂-Flottenemissionen eines Herstellers wirkt sich dies dahingehend aus, dass es zu einer zusätzlichen rechnerischen Reduzierung der CO₂-Flottenemissionen in Abhängigkeit der Anzahl der für Supercredits qualifizierten Fahrzeuge kommt. Hierdurch entsteht für die Fahrzeughersteller ein besonderer Anreiz zur Entwicklung und zum Vertrieb entsprechender Fahrzeugkonzepte.

In der EU liegt das Qualifikationskriterium für eine mehrfache Anrechnung masseunabhängig bei 50 g CO₂/km. Der entsprechende Multiplikator wird schrittweise von 2,0 im Jahr 2020 auf 1,0 im Jahr 2023 abgesenkt werden. Insgesamt darf ein Hersteller über diesen Zeitraum verteilt seine CO₂-Flottenemissionen um insgesamt 7,5 g CO₂/km mindern [EUR13f].

Auf Basis der im relevanten Zeitraum erwarteten Technologien ist es nur auf Basis von BEV, PHEV / REEV oder Brennstoffzellenfahrzeugen möglich, den relevanten Schwellenwert von 50 g CO₂/km zu unterschreiten. Faktisch bedeutet die Einführung von Supercredit-Regelungen eine Lockerung der CO₂-Zielwertvorgaben für Fahrzeughersteller in Abhängigkeit der Anzahl der verkauften Fahrzeuge der genannten Antriebsstrangtypen. Auch deutsche Hersteller legen in ihrer Technologiestrategie einen wesentlichen Fokus auf elektrifizierte Antriebskonzepte und können daher von entsprechenden Regelungen profitieren. Abb. 7-3 zeigt hierzu, welche BEV oder PHEV / REEV von den Fahrzeugherstellern bereits angeboten oder fest angekündigt sind. Es ist zu beobachten, dass im SEG-1 überwiegend BEV angeboten werden, während in höheren Fahrzeugsegmenten primär PHEV entwickelt werden. Auch Ford, Fiat, der PSA-Konzern sowie asiatische Hersteller wie z.B. Toyota bieten elektrifizierte Fahr-

zeugkonzepte an, so dass aus der Supercredit-Regelung kein spezieller, auf deutsche Hersteller begrenzter Wettbewerbsvorteil oder -nachteil entsteht.

Die gegenwärtig in der EU vorgenommene absolute Definition des Supercredit-Qualifikationskriteriums – ein CO₂-Ausstoß von weniger als 50 g CO₂/km – führt dazu, dass in höheren Fahrzeugsegmenten PHEV mit vergrößerter rein elektrischer Reichweite angeboten werden müssen, um Supercredits zu erhalten. Zur Erzielung einer höheren elektrischen Reichweite muss das Batteriesystem entsprechend größer dimensioniert werden, was bedeutende Kostensteigerungen zur Folge hat. Eine gleichmäßigere Lastenverteilung könnte diesbezüglich durch ein relatives Supercredit-Qualifikationskriterium erreicht werden, z.B. durch Definition des Kriteriums relativ zur masseabhängigen CO₂-Zielwertvorgabe oder relativ zur Regressionsgerade der Gesamtflotte.

	 smart	 MINI	 Audi		 PORSCHE	 RENAULT	 PEUGEOT  CITROËN		 TOYOTA	
SEG-1 	BEV	BEV	-	BEV	n.a.	BEV PHEV	BEV	-	BEV	BEV
SEG-2 	BEV PHEV	BEV PHEV	PHEV	BEV PHEV	PHEV	BEV PHEV	PHEV	BEV PHEV	BEV PHEV	-
SEG-3 	BEV* PHEV	PHEV	BEV* PHEV	-	PHEV	n.a.	-	n.a.	-	n.a.

n.a.: Fahrzeugsegment nicht angeboten * nur verkaufsbeschränkte Sportfahrzeuge

Abb. 7-3: Angebotene und angekündigte elektrifizierte Fahrzeuge ausgewählter Fahrzeughersteller

Im internationalen Vergleich existieren Supercredit-Regelungen, welche andere Qualifikationskriterien an Stelle einer absoluten CO₂-Zielvorgabe setzen. In den USA werden an alle BEV und FCEV Supercredits vergeben, ebenso an CNG-Fahrzeuge und PHEV mit einer elektrischen Mindestreichweite, vgl. Abb. 7-4. In China finden sich international die höchsten Supercredit-Multiplikatoren. Die Multiplikatoren stellen dabei die Maximalwerte im Betrachtungszeitraum dar.

Aus dem internationalen Vergleich könnten somit vor allem vier Mechanismen die Kosteneffizienz der Zielerreichung für Fahrzeughersteller steigern.

- Die Aufhebung der Deckelung der Supercredit-Anrechnung
- Die Erhöhung des Supercredit-Multiplikators
- Die Definition des Supercredit-Qualifikationskriteriums für PHEV auf Basis der rein elektrischen Reichweite.
- Die Gewährung von Supercredits auf Basis eines relativen Supercredit-Qualifikationskriteriums.

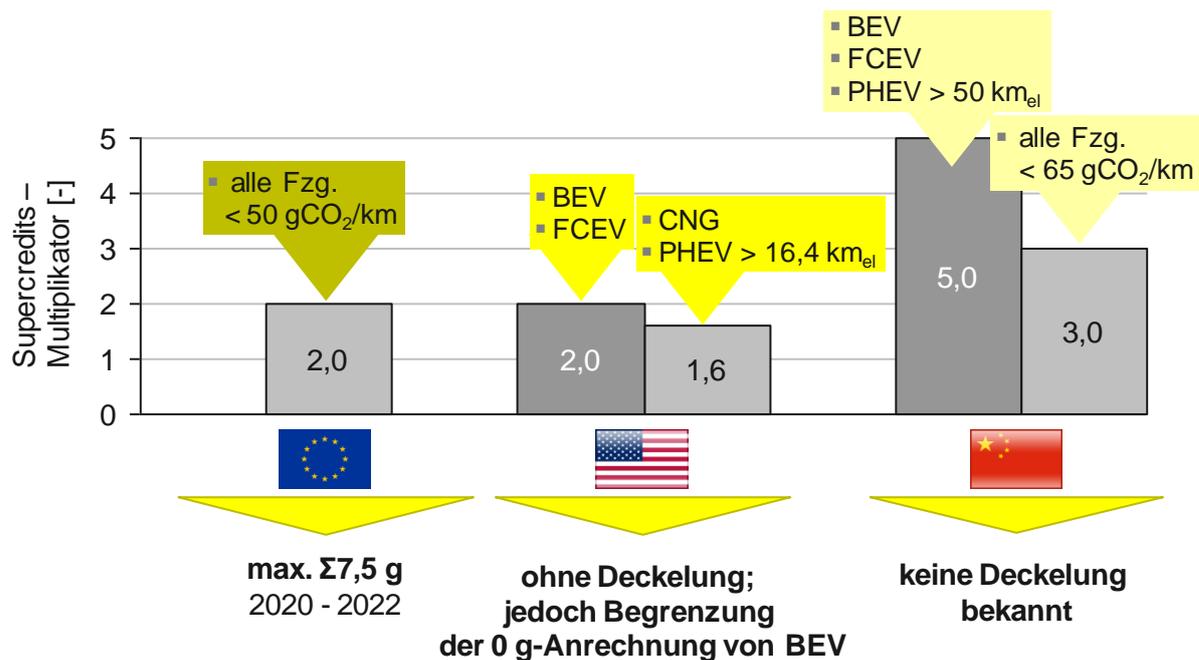


Abb. 7-4: Supercredit-Regelungen im internationalen Vergleich (maximale Multiplikatoren) [EUR09] [EPA12] [SAC14]

7.2.3 Banking-Borrowing-Systeme

In der gegenwärtigen EU CO₂-Gesetzgebung werden den Herstellern auf Basis ihrer Durchschnittsflottenmasse jährlich spezifische Flottengrenzwerte vorgegeben. Bei Nichterreichung der Grenzwerte sind von den Herstellern Strafzahlungen zu leisten. Dabei ist irrelevant, inwiefern in vorangegangenen Jahren oder Folgejahren die CO₂-Flottengrenzwerte erreicht oder unterschritten werden. Abrechnungsrelevant sind einzig die CO₂-Flottenemissionen pro Betrachtungsjahr. Demgegenüber ist es im Rahmen von Banking-Borrowing-Systemen gestattet, die CO₂-Zielwerterreichung zwischen einzelnen Abrechnungsperioden zu verrechnen. Beispielsweise kann eine Überschreitung des CO₂-Zielwertes in einem einzelnen Jahr durch die gegebenenfalls in den Vorjahren erreichte Unterschreitung des CO₂-Zielwertes ausgeglichen und auf diese Weise Strafzahlungen vermieden werden. Damit wird die Zielwerterreichung zeitlich flexibilisiert. Durch die Ausweitung des Handlungsspielraumes kann die Kosteneffizienz der Zielerreichung aus Sicht der Fahrzeughersteller grundsätzlich steigen.

Für die effizienzsteigernde Anwendung von Banking-Borrowing-Systemen existieren verschiedene Szenarien:

- Glättung sprunghaft steigender CO₂-Zielwertvorgaben;
- Glättung der Auswirkung zyklischer Fahrzeugentwicklungsprozesse;
- Glättung nachfragebasierter Schwankungen der CO₂-Emissionen.

Auf Basis der CO₂-Monitoringdaten für Pkw in der EU aus dem Jahr 2012 zeigt sich, dass unter Berücksichtigung der geltenden Phase-in-Regelungen viele Hersteller mit ihren Marken, darunter Audi, BMW, Volkswagen und Opel die Zielvorgaben übererfüllen, vgl. Abb. 7-5.

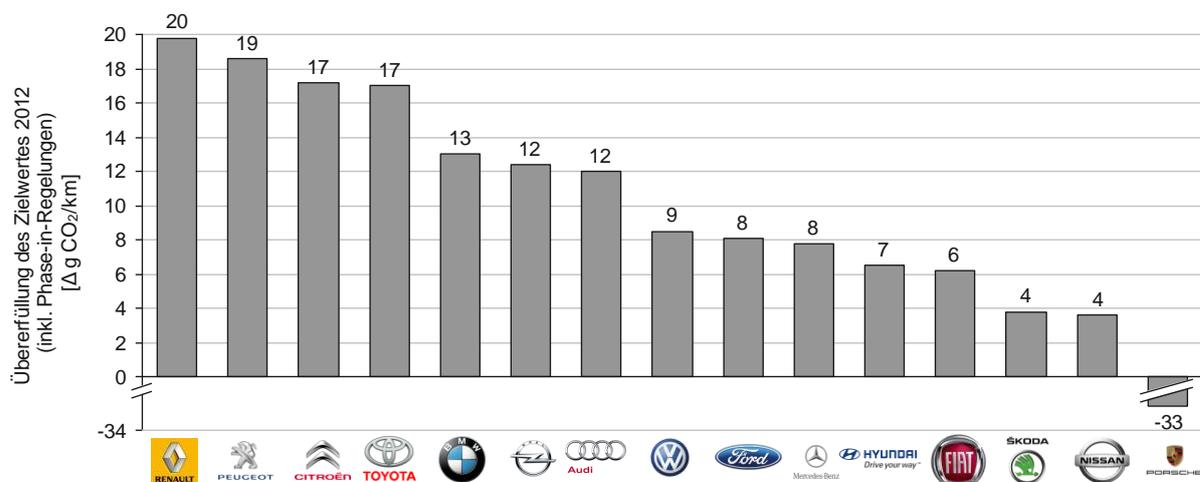


Abb. 7-5: Zielerreichung der Fahrzeughersteller im Jahr 2012 inkl. Phase-in-Regelungen

Diese Hersteller könnten im Zuge eines Banking-Borrowing-System die Kosteneffizienz der Zielerreichung dadurch steigern, dass sie diese Übererfüllung zum Ausgleich späterer Zielwertverfehlungen, z.B. im Zeitraum nach 2015 nutzen. Auch Fahrzeughersteller, die im Jahr 2012 die Zielwertvorgabe verfehlen, können die Kosteneffizienz der Zielerreichung steigern, indem sie Strafzahlungen für das Jahr 2012 durch mögliche Übererfüllung der Zielwertvorgaben in künftigen Abrechnungsperioden vermeiden.

International bestehen Banking-Borrowing-Regelungen vor allem in den USA, wo bei Übererfüllung der Zielwertvorgaben erworbene Credits bis zu fünf Jahre zum Ausgleich von künftigen Zielwertverfehlungen genutzt werden können. Umgekehrt dürfen Zielwertverfehlungen durch Credits der vorausgehenden zwei Jahre ausgeglichen werden. Zu Beginn der CO₂-Regulierung in den USA besteht zudem die Möglichkeit erworbene Credits aus ähnlichen Vorgängerprogrammen von NHTSA und CARB aus den Jahren 2009 bis 2011, also vor Beginn der hier betrachteten nationalen CO₂-Regulierung, zu konvertieren und entsprechend einzusetzen [EPA12].

Wenn im Rahmen von Banking-Borrowing-Systemen eine zeitliche Spanne definiert wird, innerhalb derer CO₂-Flottenemissionen von den Fahrzeugherstellern verrechnet werden

können, wird dennoch die langfristige CO₂-Zielwerterreichung sichergestellt. Banking-Borrowing-Systeme wirken sich demnach nicht negativ auf die Erreichung der CO₂-Gesamtziele aus.

7.2.4 CO₂-Zertifikatehandel

Neben dem Verkehrssektor sind insbesondere CO₂-intensive Industrien, die Luftfahrt sowie der Bereich der Energieerzeugung Gegenstand der CO₂-Regulierung. Während gegenwärtig bei Pkw und LNF exakte herstellereinspezifische Zielvorgaben definiert werden, ist im industriellen Bereich in der EU ein CO₂-Zertifikatehandel etabliert. Anstelle unternehmensspezifischer Zielvorgaben tritt die Verpflichtung, am Ende definierter Abrechnungsperioden CO₂-Emissionszertifikate in Höhe der tatsächlichen CO₂-Emissionen nachzuweisen. Es ist grundsätzlich denkbar, Elemente des Handelssystems auch im Verkehrssektor anzuwenden. Durch die Handelsmöglichkeit kann die Kosteneffizienz der Zielerreichung prinzipiell gesteigert werden.

7.2.4.1 Ausgestaltungsmöglichkeiten im Verkehrssektor

Das Konzept des CO₂-Zertifikatehandels im Verkehrssektor bietet vielfältige Ausgestaltungsmöglichkeiten, mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen, vgl. Abb. 7-6.

		Vorteile	Nachteile
Integration	Geschlossen (nur Automobilindustrie)	<ul style="list-style-type: none"> Tatsächliche CO₂-Senkung im Verkehrssektor bei Steigerung der Effizienz Mit festen CO₂-Zielwertvorgaben kombinierbar 	<ul style="list-style-type: none"> Volkswirtschaftlich durch fehlende Integration mit weiteren Branchen keine Optimallösung
	Offen (kombiniert; gesamte Industrie)	<ul style="list-style-type: none"> Volkswirtschaftlich theoretisch optimal Optimale Steigerung der Effizienz der Zielerreichung für die Fahrzeughersteller 	<ul style="list-style-type: none"> Bei alleinigem Zertifikatehandel ist die CO₂-Senkung im Verkehrssektor nicht sichergestellt
Rahmen	Nutzungsphase	<ul style="list-style-type: none"> CO₂-Emissionen transparent bestimmbar 	<ul style="list-style-type: none"> Vernachlässigung der Fahrzeugherstellung und -entsorgung sowie evtl. Upstream-Emissionen
	Lebenszyklus	<ul style="list-style-type: none"> Theoretisch vollständiger Erfassung aller dem Fahrzeug zuzuordnbarer CO₂-Emissionen 	<ul style="list-style-type: none"> Praktisch nur schwer umsetzbar
Adressat	Hersteller	<ul style="list-style-type: none"> Begrenzte Anzahl von Akteuren zur praktikablen Erfassung 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Erfassung tatsächlicher CO₂-Emissionen während der Nutzungsphase möglich
	Energiebereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> Erfassung tatsächlicher CO₂-Emissionen während der Nutzungsphase möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Hoher Umsetzungsaufwand

Abb. 7-6: Ausgestaltungsmöglichkeiten des CO₂-Zertifikatehandels im Verkehrssektor

Bezüglich des Integrationsgrads des CO₂-Zertifikatehandels mit anderen Branchen, z.B. der Energieerzeugung kann zwischen einem geschlossenen und offenen System unterschieden werden. In einem geschlossenen System bleibt der Handel auf den Verkehrssektor selbst beschränkt, während in einem offenen System intersektoraler Handel ermöglicht wird. Grundsätzlich ist die Kosteneffizienz der Zielerreichung aus volkswirtschaftlicher Sicht umso größer, je weiter die Integration gefasst wird. Demgegenüber wird in einem geschlossenen System, welches nur die Fahrzeughersteller umfasst, sichergestellt, dass es zu einer tatsächlichen technischen Reduktion der CO₂-Flottenemissionen in diesem Sektor kommt. Im Folgenden sollen beide Systeme vertieft betrachtet werden.

Für eine tiefergehende Analyse sowie weitere Ausgestaltungsarten des Zertifikatehandels sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen, z.B. [JOC09], [EWR05].

7.2.4.2 Offener CO₂-Zertifikatehandel

Bei einer Einbindung des Verkehrssektors in einen offenen CO₂-Zertifikatehandel werden a priori die erwarteten gesamten CO₂-Emissionen während der Fahrzeugnutzungsphase auf Grundlage einer durchschnittlichen Fahrleistung [km] und der spezifischen CO₂-Emissionen im Normzyklus [g CO₂/km] berechnet. Sollte der Fahrzeughersteller im Rahmen des Emissionshandels zur Abgabe der Emissionszertifikate verpflichtet sein, hätte er beim erstmaligen Verkauf des Fahrzeugs die fahrleistungs-äquivalente Menge an CO₂-Zertifikaten nachzuweisen. Damit die Effizienzvorteile dieses Regulierungssystems ausgeschöpft werden können, ist die Möglichkeit des Zertifikatehandels zwischen den Herstellern, aber insbesondere auch mit Unternehmen anderer Branchen zu schaffen.

Wenn für einen bestimmten Fahrzeughersteller in einer Grenzkostenbetrachtung die Vermeidung einer Einheit CO₂ durch technologische Maßnahmen zur CO₂-Reduktion günstiger ist als der Kauf der entsprechenden Zertifikatmenge zum Marktpreis, wird er jene technologische Maßnahmen in die Fahrzeuge implementieren. Andernfalls wäre der Kauf der CO₂-Zertifikate die betriebswirtschaftlich sinnvolle Alternative. Für eine erste Abschätzung der zu zertifizierenden CO₂-Emissionen können auf Basis nationaler statistischer Daten die gesamten Fahrleistungen je Fahrzeugsegment und –kraftstoffart bestimmt werden. Die Bandbreite reicht dabei von etwa 140.000 km bei einem Pkw SEG-1 (Benziner) bis 300.000 km bei einem Pkw SEG-3 (Diesel) [KBA11] [HAU05] [MOC10] [IFE11].

Abb. 7-7 zeigt als Ergebnis des beschriebenen Wirtschaftlichkeitskalküls sowie der Eingangsdaten die potenzielle Strategie eines Herstellers bezüglich der Fahrzeuge des Pkw SEG-3 mit Ottomotor in Kombination mit unterschiedlichen CO₂-Zertifikatepreisen. Abgetragen sind die gesamten zusätzlichen Herstellkosten je Fahrzeug, die der Hersteller zur Erreichung von bestimmten CO₂-Flottenemissionen aufwenden muss, bzw. welche Kosten durch den Kauf von CO₂-Zertifikaten der äquivalenten Menge entstehen. Die Technologie- und Zertifikatskosten variieren dabei gemäß der Szenarioannahmen, wobei im progressiven Szenario grundsätzlich die Zertifikatskosten am höchsten, die Technologiekosten hingegen am niedrigsten ausfallen. Diese reichen dabei von 10 €/t CO₂ im konservativen Szenario über

30 €/t CO₂ im Trendszenario und 100 €/t CO₂ im progressiven Szenario. Diese Annahmen sind an den durchschnittlichen Zertifikatspreis der vergangenen Jahre, den initial angestrebten langfristigen Zertifikatspreis bzw. eine Hochpreisentwicklung angelehnt [EEX13] [SUE13].

Im konservativen wie im Trendszenario existiert kein Schnittpunkt zwischen Kostenkurven der technologiebasierten CO₂-Reduzierung und der äquivalenten Abgeltung durch CO₂-Zertifikate. Die Zertifikatskostenkurve verläuft stets unterhalb der Technologiekostenkurve, wobei der Abstand zwischen den Kurven mit zunehmender absoluter CO₂-Reduktion wächst. In diesen Szenarien wäre es demnach aus Sicht der Fahrzeughersteller die wirtschaftlichere Alternative, vollständig auf die technische Reduktion der CO₂-Emissionen zu verzichten und die CO₂-Emissionen stattdessen vollständig über CO₂-Zertifikate abzugelten.

Lediglich im progressiven Szenario wäre es günstiger, CO₂-Emissionen zumindest zum Teil durch technologische Maßnahmen zu reduzieren. Die Reduktion der CO₂-Emissionen von 213 g CO₂/km (Referenzfahrzeug Pkw SEG-3 Benziner) auf 150 g CO₂/km über technologische Maßnahmen wäre mit einem Herstellkostenanstieg von etwa 1.100 € verbunden, die Kosten für die Abgeltung über CO₂-Zertifikate lägen ungefähr 200 € darüber. Sollen die CO₂-Emissionen des Referenzfahrzeugs jedoch über 150 g CO₂/km hinaus gesenkt werden, steigen die Technologiekosten stärker an als die Zertifikatskosten. Über 150 g CO₂/km hinaus ist es demnach wirtschaftlicher, CO₂-Emissionen über den Kauf von CO₂-Zertifikaten abzugelten.

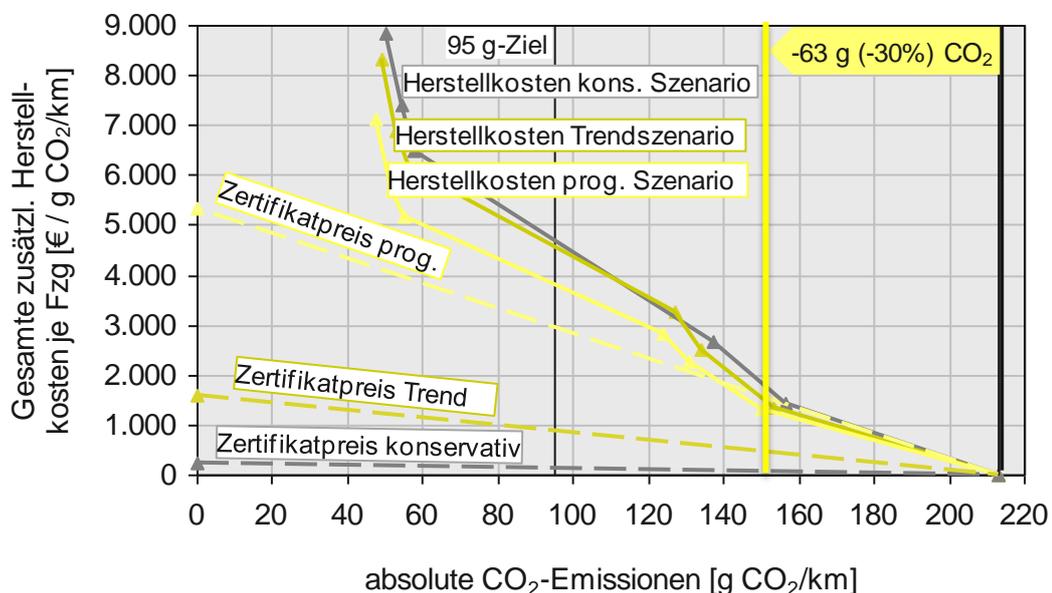


Abb. 7-7: Technologiestrategie bei Pkw SEG-3 2025 unter Einbeziehung des CO₂-Zertifikatehandels

Für Pkw SEG-1 und SEG-2 ist es aufgrund geringer jährlicher Fahrleistungen und höherer grammbezogener CO₂-Minderungskosten selbst im progressiven Szenario wirtschaftlich,

ausschließlich CO₂-Zertifikate zu erwerben und vollständig auf die Implementierung von Technologiepaketen zu verzichten.

Auf Basis dieses Kostenkalküls würde sich unter Einbeziehung des Verkehrssektors in den internationalen CO₂-Zertifikatehandel demnach eine Situation einstellen, in der Pkw- und LNF-Hersteller aus Kostengründen nur noch in geringem Maße die CO₂-Emissionen ihrer Fahrzeugflotten auf Basis technologischer Maßnahme mindern würden.

Ein Großteil der CO₂-Emissionen würde über den Zukauf von CO₂-Zertifikaten aus Industrie- und Wirtschaftsbranchen mit geringeren technologischen CO₂-Minderungskosten kompensiert. Eine vergleichende Studie, vgl. [MCK09], zeigt beispielsweise, dass in Deutschland im Transportsektor sowie im Energiesektor etwa 14 Mt CO₂ kostenneutral eingespart werden können, während sich im Industriebereich Einsparmaßnahmen in Höhe von 30 Mt durch entsprechende Einsparungen während der Nutzungsphase ohne Mehrinvestitionen realisieren lassen. Auch über die genannten Schwellen hinaus ist in den jeweiligen Branchen die technologische CO₂-Vermeidung möglich, jedoch zu steigenden Grenzkosten. Während die Vermeidung einer zusätzlichen Tonne CO₂ im Energiesektor mit ca. 30 – 50 €/t CO₂ und im Industriesektor mit bis zu 150 €/t CO₂ zu kalkulieren ist, entstehen im Transportsektor zunächst 100 – 200 €/t CO₂ und für noch weitergehende CO₂-Reduzierungen Grenzkosten von über 3.500 €/t CO₂. Bei einer intersektoralen Integration der CO₂-Zielwerterreichung könnte sich somit die Kosteneffizienz aus Sicht der Fahrzeughersteller daher deutlich verbessern.

Demgegenüber erscheint aus Sicht der Fahrzeugendkunden die teilweise Implementierung fortschrittlicher Technologiepakete wirtschaftlich, da sich die damit einhergehenden Mehrkosten wie gezeigt über eingesparte Kraftstoffkosten amortisieren können. Entsprechende Technologien zur CO₂-Emissionsminderung werden von den Kunden demnach bis zur Amortisationsgrenze nachgefragt. Die Fahrzeughersteller können hierfür entstehende Mehrkosten an die Endkunden weitergeben. Ein Fahrzeughersteller wird seine Technologiestrategie demnach nicht alleine auf Basis der im Rahmen dieses Kapitels angestellten Kostenbetrachtungen definieren, sondern Kundenwünsche adäquat berücksichtigen, um Wettbewerbsnachteile zu vermeiden.

Im Vergleich zur bestehenden CO₂-Regulierung mit fester CO₂-Zielwertvorgabe je Fahrzeughersteller sind in einem System mit CO₂-Zertifikatehandel erhöhte CO₂-Flottendurchschnittsemissionen bei Pkw und LNF zu erwarten. Da die innerhalb der Grenzen des gesamten CO₂-Zertifikatehandelssystems emittierte CO₂-Gesamtmenge unmittelbar über die Anzahl der ausgegebenen CO₂-Zertifikate vorgegeben werden kann, ist die CO₂-Gesamtzielerreichung über alle Industriebranchen hinweg dennoch sichergestellt.

7.2.4.3 Geschlossener CO₂-Zertifikatehandel

Im Rahmen der amerikanischen CO₂-Gesetzgebung erwirbt jeder Fahrzeughersteller in Abhängigkeit der durchschnittlichen Kraftstoffeffizienz bzw. der durchschnittlichen CO₂-Emissionen seiner Fahrzeugflotte CO₂-Credits. Je höher die durchschnittliche Kraftstoffeffizienz seiner Fahrzeugflotte ist, desto mehr Credits erhält er. Am Ende jeder Abrechnungsperi-

oder muss grundsätzlich jeder Fahrzeughersteller CO₂-Credits in Höhe seiner CO₂-Zielwertvorgabe vorweisen. Liegen die durchschnittlichen CO₂-Flottenemissionen eines Herstellers über seiner Zielvorgabe, entsteht ihm ein Credit-Fehlbetrag. Abhängig von der Anzahl der fehlenden Credits berechnet sich in diesem Fall die Höhe der Strafzahlung für den betroffenen Fahrzeughersteller. Im Rahmen eines Credit-Handelssystems kann ein Hersteller mit Credit-Fehlbetrag sein Defizit durch Zukauf von überschüssigen Credits eines anderen Fahrzeugherstellers, z.B. von Tesla Motors, ausgleichen und damit Strafzahlungen vermeiden. Der Credit-Handel findet dabei auch unter Berücksichtigung der angesetzten unterschiedlich hohen Lebenslaufleistungen, z.B. von Pkw und Pickups / SUVs, statt [EPA12].

Damit steigt sowohl die Kosteneffizienz der CO₂-Regulierung für Hersteller mit Creditdefizit als auch jener Hersteller mit Credit-Überschuss, da sich für diese über den Creditverkauf zusätzliche Einnahmen ergeben. Faktisch entspricht diese Form der Flexibilisierung der Zielerreichung für die Fahrzeughersteller einem geschlossenen, auf die Fahrzeughersteller beschränkten CO₂-Zertifikatehandelssystem unter Beibehaltung von herstellerspezifischen CO₂-Zielwertvorgaben. Da der Zertifikatehandel auf die Fahrzeughersteller im Markt beschränkt ist, wird sichergestellt, dass technologische Maßnahmen gemäß der durchschnittlichen CO₂-Zielwertvorgabe für die Fahrzeughersteller innerhalb des Fahrzeugmarktes ergriffen werden und keine Auslagerung entsprechender Maßnahmen auf andere Industriebranchen stattfindet.

Ein geschlossener CO₂-Zertifikatehandel beinhaltet den direkten Austausch von Kapital zwischen den Fahrzeugherstellern. Während hierdurch prinzipiell eine Steigerung der Effizienz der Zielerreichung gegenüber einer isolierten Einzelzielerreichung realisiert werden kann, kann sich dies bei ungünstiger Definition der CO₂-Grenzwertgerade negativ auf die Wettbewerbsneutralität der CO₂-Regulierung auswirken. Bei einer zu flach definierten CO₂-Grenzwertgerade würde ein starker Kapitalfluss von Herstellern mit Schwerpunkten in höheren Fahrzeugsegmenten zu jenen mit Schwerpunkten in niedrigeren Fahrzeugsegmenten stattfinden, wodurch letztere Hersteller einen direkten monetären Vorteil aus der CO₂-Regulierung ziehen könnten. Ohne geschlossenen CO₂-Zertifikatehandel wäre eine aus Wettbewerbsicht zu flache Definition der CO₂-Grenzwertgerade zwar ebenso mit ungleichen Lastenverteilungen für verschieden positionierte Hersteller verbunden, es fänden jedoch keine zusätzlichen Kapitalflüsse statt.

7.2.5 Technologiespezifische Förderungen in der CO₂-Regulierung

Ähnlich zu Supercredit-Regelungen bieten technologiespezifische Boni die Möglichkeit, die Verbreitung besonders effizienter aber wirtschaftlich noch nicht hinreichend wettbewerbsfähiger Technologien durch Gewährung eines Bonus auf die CO₂-Flottenemissionen für die Fahrzeughersteller zu fördern. Der Bonus wird dabei nicht indirekt über Produktions- oder Absatzmultiplikatoren berechnet, sondern ergibt sich direkt als Bonus auf die eigentlichen CO₂-Flottenemissionen des Fahrzeugherstellers. In Abgrenzung zu Ökoinnovationen kommen dabei auch Technologien in Betracht, die ihre volle Wirksamkeit bereits in den verwendeten Fahrzyklen zeigen, jedoch z.B. aufgrund zielgerichteter Innovationspolitiken weiterge-

hend gefördert werden sollen. Beispielsweise existiert im Rahmen der CO₂-Gesetzgebung in den USA die Möglichkeit, eine zusätzliche CO₂-Gutschrift zu erhalten, wenn im Segment der Full-Size Pick-up-Trucks ein definierter Prozentsatz der Neufahrzeugflotte eines Herstellers mit hybriden Antriebskonzepten ausgerüstet ist [EPA12]. Eine weitere technologiespezifisch definierte Bonus-Regelung in den USA adressiert Fahrzeuge, welche mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden, z.B. Gas oder Biodiesel und bivalente Fahrzeuge, welche sowohl mit herkömmlichem Ottokraftstoff, als auch mit Gas betrieben werden können [EPA12].

Ähnlich zu Supercredits schwächt die Gewährung eines Bonus für den Einsatz bestimmter Technologien die CO₂-Minderungsanforderungen für die Fahrzeughersteller ab, wodurch die CO₂-Gesamtzieelerreichung gemindert wird. Inwiefern diese Förderung Innovationen im Verkehrsbereich begünstigt, kann nicht pauschal beurteilt werden. Einerseits entstehen zusätzliche Innovationsanreize bezüglich der explizit geförderten Technologien, andererseits können Innovationsanreize durch die insgesamt abgeschwächten CO₂-Minderungsanforderungen in nicht explizit geförderten technologischen Bereichen abgeschwächt werden.

7.3 Zusammenfassende Bewertung und Zwischenfazit

Die gegenwärtige CO₂-Regulierung in Europa kombiniert einen herstellerspezifischen CO₂-Zielwert mit begleitenden Mechanismen wie Supercredits oder Ökoinnovationen. Durch eine entsprechende Ausweitung begleitender Regelungen zur Erreichung der CO₂-Zielvorgaben kann aus Sicht der Fahrzeughersteller die Kosteneffizienz der CO₂-Regulierung grundsätzlich gesteigert werden, was sich ggfs. auch positiv auf die Entwicklung der Endkundenlistenpreise auswirken kann.

Einerseits kann dies durch die sachliche, zeitliche oder sektorale Flexibilisierung erreicht werden, z.B. mit einem offenen oder geschlossenen CO₂-Zertifikatehandel, Banking-Borrowing-Systemen oder Ökoinnovationen. Diesen Mechanismen ist gemein, dass ein formuliertes CO₂-Gesamtziel innerhalb der gesetzten Grenzen des Regulierungssystems eingehalten bzw. nicht abgeschwächt wird. Die Effizienzsteigerung ergibt sich daraus, dass sich der Handlungsspielraum der Hersteller aufweitet und die Zielerreichung sachlich, zeitlich oder sektoral optimiert werden kann. Demgegenüber stehen Regelungen, welche über eine indirekte oder direkte Lockerung der Zielvorgaben die Zielerreichungskosten für die Fahrzeughersteller senken, z.B. Supercredits oder eine Technologieförderung über die Gewährung eines CO₂-Bonus. Unter Anwendung dieser Fördersysteme kann in Abhängigkeit der Höhe des gewährten Bonus die CO₂-Gesamtzieelerreichung leicht reduziert werden.

Maßnahme	Wirkung	Erreichung der CO ₂ -Minderungsziele	Innovationsanreize
CO₂-Zertifikatehandel	Flexibilisierung der Zielerreichung durch Integration mit anderen Branchen.	Gleichbleibend über alle Wirtschaftssektoren	-
Credit-Handel	Flexibilisierung der Zielerreichung durch Integration mit anderen Fahrzeugherstellern.	Gleichbleibend über Pkw- bzw. LNF-Flotte	o
Banking-Borrowing-System	Zeitliche Flexibilisierung der Zielerreichung	Gleichbleibend im zeitlichen Verlauf	(+)
Supercredits	Lockerung der Zielvorgabe bei Absatz besonders CO ₂ -emissionsarmer Fahrzeuge (faktisch BEV, PHEV, FCEV)	Leicht abgeschwächt	(+) (geförderte Technologien)
Technologiespezifische Förderung	Lockerung der Zielvorgabe bei Einsatz definierter Technologien	Leicht abgeschwächt	(+) (geförderte Technologien)
Ökoinnovationen	Ausweitung der technologischen Optionen zur Zielerreichung	Gleichbleibend im realen Fahrbetrieb	+
+ steigende Anreize o gleichbleibende Anreize - sinkende Anreize			

Abb. 7-8: Maßnahmen zur Steigerung der Kosteneffizienz für Fahrzeughersteller

Die potenzielle Wirkung der beschriebenen begleitenden Maßnahmen auf die Innovationstätigkeit der Fahrzeughersteller ist in vielen Fällen von gegenläufigen Effekten gekennzeichnet. Systeme, welche über eine Förderung direkt oder indirekt auf einzelne Technologien oder Entwicklungszweige abzielen, könnten in den adressierten Bereichen zu erhöhter Innovationstätigkeit führen, wohingegen Innovationsanreize in nicht geförderten Bereichen verringert sein könnten. Eine Pauschalbewertung der diskutierten Maßnahmen ist nicht möglich und hängt vielmehr von den spezifischen Anforderungen und Zielsetzungen ab, z.B. der Kostensenkung für die Fahrzeughersteller, der volkswirtschaftlichen Optimierung oder der Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit der Automobilindustrie. Aus der geführten Diskussion kann jedoch insbesondere der auf den Verkehrssektor beschränkte Credit-Handel hervorgehoben werden, da er die Kosteneffizienz der Zielerreichung für einzelne Hersteller steigern kann, ohne dabei CO₂-Gesamtziele abzuschwächen oder direkte negative Effekte auf die Innovationstätigkeit der Hersteller in Summe auszuüben.

8 Handlungsempfehlungen für den europäischen Gesetzgeber

Der Rat und das Europäische Parlament haben die Europäische Kommission beauftragt, die CO₂-Regulierung von neuen Pkw und LNF bis Ende 2015 zu überprüfen und einen Bericht über ihre Erkenntnisse vorzulegen. Dieser Bericht soll gegebenenfalls Änderungsvorschläge umfassen, einschließlich der möglichen Festlegung von realistischen und erreichbaren Zielwerten für die Zeit bis 2025. Die Europäische Kommission soll bei der Ausarbeitung dieser Vorschläge dafür sorgen, dass sie so wettbewerbsneutral wie möglich sowie sozialverträglich und nachhaltig sind.

Aus den durchgeführten Untersuchungen zeigt sich, dass mit den im Betrachtungszeitraum serienreif zur Verfügung stehenden Minderungstechnologien eine weitere signifikante Senkung der CO₂-Flottenemissionen bis zum Jahr 2030 technisch möglich ist. Die Bandbreite möglicher zukünftiger CO₂-Flottenzielwerte wird dagegen vor allem von Erwägungen der Kosteneffizienz und der Wirtschaftlichkeit begrenzt. Die in dieser Studie abgeleiteten technologisch und wirtschaftlich realisierbaren CO₂-Minderungspotenziale bei Pkw und LNF bis 2025 und 2030 stellen objektive Leitplanken für die von der Europäischen Kommission zu prüfende Weiterentwicklung der CO₂-Regulierung nach 2020/2021 dar.

Zur Erfüllung der Zielwerte für das Jahr 2015 werden von den Fahrzeugherstellern bereits mehrere besonders wirtschaftliche Technologien in den Markt eingeführt, die ein effizientes Kosten-Nutzen-Verhältnis bieten. Der ab Ende 2020 geltende EU-Flottenzielwert von 95 gCO₂/km stellt jedoch auch aus technologischer Perspektive bereits eine Herausforderung dar und kann nur unter günstigen Rahmenbedingungen wirtschaftlich realisiert werden, vgl. [ERN12] sowie Ergebnisse Kap. 6. Die Herstellkosten für Minderungstechnologien steigen mit fortschreitender Optimierung für alle Fahrzeugsegmente überproportional an, vgl. Kostenkurven in Kap. 5.4. Ambitioniertere Flottenzielwerte gehen daher mit deutlich steigenden Fahrzeugmehrkosten einher. Aus Sicht der Endkunden sind weitergehende Flottenzielwerte nur dann wirtschaftlich vertretbar, wenn den damit verbundenen Fahrzeugmehrkosten wenigstens gleichhohe Einsparungen von Kraftstoffkosten gegenüberstehen. Im Trendszenario würde demnach im Jahr 2025 ein CO₂-Flottenemissionwert in Höhe von 96 – 99 g CO₂/km erreicht, welche sich bis zum Jahr 2030 auf 78 – 79 g CO₂/km reduziert. Nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen erscheint allenfalls der obere Zielwert - in Höhe von 78 g CO₂/km - der von der Europäischen Kommission zu prüfenden Zielbandbreite für das Jahr 2025 unter Wirtschaftlichkeitsaspekten realisierbar und dies nur unter den günstigen Rahmenbedingungen des progressiven Szenarios. Eine weitere Zielwert-Reduktion der CO₂-Flottenemissionen impliziert eine weitere signifikante Steigerung der zusätzlichen Herstellkosten je Fahrzeug, welche sich für den durchschnittlichen Endkunden nicht amortisieren würden. Diese Zusatzkosten können somit von den Herstellern nicht an die Endkunden weitergegeben werden.

Neben der Betrachtung der technologischen und wirtschaftlichen Minderungspotenziale hat die Europäische Kommission auch die Möglichkeit, verschiedene Optionen für eine Verbesserung der Kosteneffizienz und Wirtschaftlichkeit des existierenden Regulierungsrahmens zu

prüfen. Hierzu sind in erster Linie Instrumente zu nennen, die den Markthochlauf besonders emissionsarmer Fahrzeuge beschleunigen und/oder die Kosteneffizienz der Zielerreichung für die Fahrzeughersteller verbessern. Daneben kommt die verstärkte Anrechnung von Technologien zur realen Emissionsminderungen in Betracht, die durch Maßnahmen erzielt werden, die sich nicht auf die im Normzyklus gemessenen Emissionen auswirken. Darüber hinaus können Instrumente wie Banking und Borrowing die Zielerreichung über die Modellzyklen zeitlich flexibilisieren und maßgeblich zur Verbesserung der Kosteneffizienz der CO₂-Regulierung beitragen.

Selbst die zitierten 78 g CO₂/km als Flottenzielwert für 2025 können nur bei einem verstärkten Einsatz von Fahrzeugen mit innovativen Antriebstechnologien, z.B. BEV, PHEV oder FCEV, erreicht werden. Prognosen zum Markthochlauf der Elektromobilität sind nach wie vor mit Unschärfen behaftet. Einen großen Einfluss hierauf haben die entsprechenden Rahmenbedingungen, insbesondere die Kostenentwicklung bei Batteriesystemen oder der Ausbau der Ladeinfrastruktur. Diese Aspekte können die verschiedenen Hersteller nur in begrenztem Umfang beeinflussen. Sie sind aber für die wirtschaftliche Erreichung der jeweiligen Flottenzielwerte von entscheidender Bedeutung. Daher sollte ein zukünftiger Fokus auf der Marktentwicklung sowie den begleitenden Rahmenbedingungen liegen und entsprechende hierauf gerichtete, unterstützende Maßnahmen geprüft werden. Analog zu den USA sollte vor dem Hintergrund der Langfristigkeit der formulierten Ziele und der starken Abhängigkeit von exogenen Faktoren, z.B. der Kraftstoffpreisentwicklung, eine regelmäßige Überprüfung im Abstand von max. 3 Jahren erfolgen.

Die Minderungslastenverteilung der gegenwärtigen CO₂-Regulierung kann im Wesentlichen durch die Variation der Steigung der massebasierten Zielwertkurve eingestellt werden. Im Zeitraum bis 2030 deutet sich an, dass eine weitergehende Abflachung dieser Geradensteigung bereits aufgrund der Wirtschaftlichkeitskalküle der Endkunden und der Hersteller erfolgen wird. Dabei ist jedoch stets der derzeit gültige Bewertungsrahmen von PHEV im NEFZ zu berücksichtigen. In Anbetracht der potenziell auch in den höheren Fahrzeugsegmenten zunehmenden Elektrifizierungsumfänge könnte sich so der Grenzfall einer Zielwertkurve mit der Steigung Null einstellen. Gerade auf lange Sicht ist demnach zu prüfen, inwiefern die Differenzierung der Zielwertvorgaben über die Geradensteigung eines massebasierten Grenzwertes noch geeignet ist, äquivalente Minderungslasten für Hersteller mit Schwerpunkten in den unterschiedlichen Segmenten zu definieren. Damit von politischer Seite keine Beeinflussung des Produktportfolios bzw. der Flottengestaltung genommen wird, ist es denkbar, die Geradensteigung der Zielwertkurven im Zeitablauf der Entwicklung der Steigung der Regressionsgeraden über alle Neufahrzeuge im gleitenden Durchschnitt anzupassen. Dadurch würde vermieden, dass in die Modellpolitik der Hersteller über eine politisch festgelegte und weiter abgeflachte Zielwertkurve eingegriffen wird. Generell ist eine gleichmäßige Lastenverteilung über alle Segmente von zentraler Bedeutung, damit auch in Zukunft die für das Premiumsegment entwickelten Innovationen im Zeitablauf und über mehrere Modellzyklen in der Regel in kleineren Fahrzeugen eingesetzt werden und dort weitergehende Emissionsminderungen ermöglichen.

Im Sinne einer effizienten CO₂-Zielwerterreichung ist zudem in einer erweiterten Betrachtung zu prüfen, inwiefern begleitende Maßnahmen, insbesondere Credit-Handelssysteme wie in den USA, auch in der europäischen CO₂-Regulierung implementiert werden könnten. Dabei ist zu beachten, dass diese und ähnliche begleitende Maßnahmen auch indirekte Effekte, z.B. auf Innovationsanreize und damit einhergehende langfristige technologische Entwicklungen haben können. So werden ebenfalls in den USA Klimaanlage, mit a) einer höheren Effizienz, b) einer geringen Leckagerate und c) einem Kältemittel mit geringem Treibhausgaspotenzial, über zusätzliche Credits positiv berücksichtigt. Grundsätzlich sollten begleitende Maßnahmen und Rahmenbedingungen bereitgestellt werden, welche der Innovationstätigkeit der Fahrzeughersteller und –zulieferer langfristig förderlich sind.

Die durchgeführten Berechnungen und Analysen beruhen auf der Wirksamkeit der Technologien zur CO₂-Reduktion im NEFZ. Im Zuge der möglichen Einführung der WLTP-Prüfprozedur würde eine vollständige Neubewertung der technologischen Maßnahmen nötig, wodurch sich auch zentrale Analyseergebnisse in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen ändern könnten.

9 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Studie ist die Analyse technologisch möglicher und wirtschaftlich vertretbarer CO₂-Minderungspotenziale bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen bis 2025 und 2030. Die Analyse erfolgt in allen Bereichen der Studie grundsätzlich szenarienbasiert. Mit Hilfe der drei Szenarien (konservativ, Trend, progressiv) kann so eine Bandbreite möglicher, in sich konsistenter zukünftiger Entwicklungen prognostiziert werden und derzeit diskutierten Zielwerten gegenübergestellt werden.

Die europäische CO₂-Gesetzgebung fordert bei Pkw bis Ende 2020 eine Reduktion der durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Neuwagenflotte auf 95 g CO₂/km, bei LNF beträgt der Zielwert im Jahr 2020 entsprechend 147 g CO₂/km. In den Basisjahren 2010 bzw. 2011 wird von der europäischen Pkw-Neuwagenflotte hingegen durchschnittlich ca. 141 g CO₂/km ausgestoßen, von der europäischen LNF-Flotte ca. 187 g CO₂/km. Durch den Abgleich des Status quo der CO₂-Emissionen mit den legislativen Anforderungen ergibt sich sowohl bei Pkw als auch bei LNF ein starker Bedarf zur weiteren technologischen Reduktion der CO₂-Flottenemissionen. Im internationalen Vergleich der CO₂-Gesetzgebung zeigt sich, dass in der EU, auch unter Beachtung der spezifischen Flottenzusammensetzung, die anspruchsvollsten Grenzwerte implementiert wurden. Ab 2017 soll die neue WLTP-Prüfprozedur als neuer, weltweit harmonisierter Fahrzyklus in der EU zur Verwendung bereitstehen. Die etwaige Erhöhung der CO₂-Emissionen in diesem Zyklus geprüfter Fahrzeuge soll über eine geeignete Methode ausgeglichen werden, so dass es hierdurch zu keiner indirekten Verschärfung des CO₂-Zielwertes kommt.

Im Rahmen eines Technologie-Screenings wird deutlich, dass auch nach dem Jahr 2020 sowohl durch die Markteinführung innovativer Technologien als auch durch die evolutionäre Weiterentwicklung bestehender Technologien und der damit einhergehenden Kostensenkungen eine weitere Senkung der CO₂-Flottenemissionen ermöglicht wird. Im betrachteten Zeitraum bis zum Jahr 2030 lassen sich die größten Verbesserungspotenziale bei Verbrennungsmotoren identifizieren, wobei der Ottomotor im Vergleich zum Dieselmotor größere Potenziale bietet. Wesentliche technologische Verbesserungen nach dem Jahr 2020 können ferner bei der Wärmerückgewinnung erzielt werden. Es wird zudem eine Optimierung der Hybridtechnik prognostiziert, ohne dass gänzlich neue Konzepte in den Massenmarkt eindringen. Im Betrachtungszeitraum erlangen zudem Plug-in-Hybride und Fahrzeuge mit Range-Extender zunehmende Bedeutung.

Die identifizierten Einzeltechnologien werden unter Berücksichtigung von Verfügbarkeitszeitpunkten, der Anwendbarkeit auf die einzelnen Fahrzeugsegmente und den technologischen Wechselwirkungen zu Technologiepaketen zusammengefasst. Mit Annahme einer 100 %-Marktdurchdringung, ohne Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit aus Endkundenperspektive, lässt sich für jede Technologiestufe das theoretisch minimale CO₂-Flottenemissionsniveau ermitteln. Unter Berücksichtigung des Marktstruktureffekts, der Veränderung des Kraftstoffmix und der Segmentverteilung bis 2030, zeigt sich, dass sich mit konventionellen Technologiepaketen im Idealfall ein CO₂-Flottenemissionsniveau von 66 – 81 g CO₂/km bei

Pkw und 97 – 116 g CO₂/km bei LNF erzielen ließe. Mit der Hybridtechnologie ließen sich bei flächendeckendem Einsatz die Emissionen auf 54 – 67 g CO₂/km bei Pkw und 78 – 97 g CO₂/km bei LNF mindern. Bei einem vollständigen Einsatz von PHEV könnten theoretisch unter den Rahmenbedingungen des NEFZ sogar Emissionswerte in Höhe von 26 – 30 g CO₂/km bei Pkw und 41 – 48 g CO₂/km bei LNF realisiert werden. Die korrelierenden zusätzlichen Herstellkosten steigen dabei jedoch in einem progressiven Verlauf an und würde bis zu ca. 5.000 € für den konventionellen Technologiepfad erreichen, bis zu ca. 6.000 – 7.000 € für den Hybridtechnologiepfad und bis zu 9.000 € für den PHEV Technologiepfad.

Ein erster Vergleich mit vorgeschlagenen Flottenzielwerten zeigt, dass zur Erfüllung von Werten unterhalb von 68 g CO₂/km elektrifizierte Technologien und durchschnittliche bis progressive Rahmenbedingungen erforderlich wären sowie zur Erfüllung von Zielen unterhalb von 60 g CO₂/km PHEV-Technologien in einem großen Umfang im Markt nachgefragt werden müssten.

Nach der Betrachtung des technologisch theoretisch möglichen CO₂-Minderungsrahmens erfolgt szenarienbasiert die Analyse der Wirtschaftlichkeit aus Endkundenperspektive für Pkw und LNF. Als eine zentrale Annahme wird davon ausgegangen, dass sich die zusätzlichen Herstellkosten für die Endkunden amortisieren müssen und diese von einer Kraftstoffkosteneinsparung über der Haltedauer profitieren. Die Fahrzeugendkunden fragen Technologiepakete zum Endkundenlistenpreis nach, welcher im Rahmen der Modellierung z.B. durch die Bestandteile Mehrwertsteuer, Vertriebskosten, Rückstellungen und Margen ca. 60 % über den reinen Herstellkosten liegt. Auf Basis der modellierten Investitionsentscheidungen von privaten, teils mehrpreisbereiten, und gewerblichen Endkunden ergibt sich, welche Technologiepakete sich in welchem Segment im Zeitraum bis 2025 und 2030 amortisieren würden. Im Trendszenario würden bei Pkw bis 2025 überwiegend konventionelle Technologien nachgefragt, so dass die Flottenemissionen auf Basis der wirtschaftlichen Investitionsentscheidungen der Fahrzeugendkunden auf insgesamt 96 g CO₂/km absinken (-32 % - inkl. Marktstruktureffekt) würden. Ökoinnovationen könnten einen tatsächlich erzielbaren Hersteller-Flottenwert weiter senken. Darüber hinaus besitzen Supercredits eine weitere Anreizwirkung für besonders emissionsarme Fahrzeuge und schaffen eine weitere Flexibilisierung der Zielerreichung. Bis zum Jahr 2030 würden sich im Trendszenario insbesondere bei Fahrzeugen in höheren Segmenten Hybrid- und PHEV-Technologiepakete durchsetzen, da diese unter den gegebenen Rahmenbedingungen für viele Kundengruppen eine wirtschaftliche Alternative darstellen. Die Flottenemissionen würden auf 79 g CO₂/km absinken (-44 % - inkl. Marktstruktureffekt). Im Zuge der vermehrten Hybridisierung der höheren Segmente und insbesondere des Einsatzes von PHEV in den höheren Fahrzeugsegmenten entkoppelt sich der CO₂-Emissionswert zunehmend von der Fahrzeugmasse. Somit ergäbe sich eine im Zeitverlauf zunehmende Abflachung der entsprechenden Regressionsgerade im Markt, vorausgesetzt die Berechnung des CO₂-Ausstoßes von PHEV-Fahrzeugen bleibt gegenüber der ECE R 101 unverändert.

Der Vergleich der sich im Markt prognostiziert einstellenden CO₂-Flottenemissionen mit derzeit diskutierten Vorschlägen zu neuen Zielwerten zeigt je Szenario aufgrund des progressi-

ven Verlaufs der Kostenkurven eine signifikante Steigerung der Herstellkosten und damit des Endkundenlistenpreises je Fahrzeug. Durch einen Zielwert in Höhe von 68 g CO₂/km für das Jahr 2025 würde ein Herstellkostenanstieg in Höhe von 3.200 – 4.100 € je Fahrzeug bewirkt, so dass sich der daraus ergebende Endkundenlistenpreis für die Endkunden nicht vollständig amortisieren würde. Die verbleibenden Mehrkosten in Höhe von 500 € (Progressives Szenario), ca. 2.200 € (Trend Szenario) bis 3.300 € (Konservatives Szenario) wären demnach vom Fahrzeughersteller zu tragen, damit der Kunde sich dennoch für die emissionsärmere Antriebsart entscheidet. Bei einem Zielwert für das Jahr 2030 in Höhe von 50 g CO₂/km würden die Residualkosten für die Fahrzeughersteller auf 900 € (Progressives Szenario) bis 4.500 € (Konservatives Szenario) ansteigen. Da die Kosten für effizienzsteigernde Technologien progressiv ansteigen, ergibt sich im Falle einer linearen Zielwertfortschreibung eine hohe Belastung für alle Fahrzeughersteller. Nur der Zielwertvorschlag in Höhe von 78 g CO₂/km für das Jahr 2025 ließe sich nur unter den günstigen Rahmenbedingungen des progressiven Szenarios und den angenommenen Wirtschaftlichkeitsüberlegungen der Kunden darstellen. Sofern sich die zusätzlichen Herstellungskosten der Technologien aufgrund des intensiven Marktwettbewerbs nicht an die Endkunden weitergeben lassen, entsteht ebenfalls eine hohe finanzielle Belastung für die jeweiligen Fahrzeughersteller.

Bei LNF würden im gesamten Betrachtungszeitraum bis 2030 im Trendszenario von den Kunden nur konventionelle Technologiepakete eingesetzt. Bis zum Jahr 2025 würden die CO₂-Flottenemissionen unter den gegebenen Rahmenbedingungen um 25 % auf 140 g CO₂/km sinken, bis zum Jahr 2030 weiter auf 135 g CO₂/km. Im Gegensatz zu Pkw bleibt aufgrund des gleichmäßigen Einsatzes von konventionellen Technologiepaketen der starke Zusammenhang zwischen Masse und CO₂-Emissionen erhalten. Für LNF wurden bislang keine expliziten Zielwertvorschläge für den Zeitraum nach 2020 veröffentlicht, so dass die Ergebnisse an dieser Stelle nicht weiter kontrastiert werden können.

Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Berechnungsergebnisse für Pkw und LNF im Wesentlichen davon abhängen, ob und inwiefern hybride Technologien (Mild-, Full- und Plug-in-Hybride) für die privaten und gewerblichen Endkunden wirtschaftlich werden. Darauf haben zentrale Modellierungsannahmen, z.B. der von Kunden geforderte Amortisationszeitraum, einen wesentlichen Einfluss.

In der internationalen CO₂-Gesetzgebung lassen sich verschiedene Mechanismen identifizieren, durch welche die zusätzlichen Zielerreichungskosten der Fahrzeughersteller potenziell gesenkt werden können, was wiederum den Fahrzeugpreisanstieg für die Fahrzeugendkunden dämpfen kann. Eine Verbesserung der Kosteneffizienz ist insbesondere über die sachliche, zeitliche oder sektorale Flexibilisierung der Zielerreichung und die damit einhergehende Aufweitung des Handlungsspielraums der Fahrzeughersteller erzielbar. Beispiele hierfür sind Ökoinnovationen, Banking-Borrowing-Systeme oder ein Emissionshandelssystem mit oder ohne intersektorale Integration. Dabei kann auch unter Anwendung dieser Regelungen die CO₂-Gesamtzielerreichung prinzipiell sichergestellt werden.

Für die Europäische Kommission ergibt sich die Aufgabe, die Gesetzgebung zur CO₂-Reduktion und Effizienzsteigerung bei Pkw und LNF wettbewerbsneutral, sozialverträglich und nachhaltig zu gestalten. Dabei entstehen wesentliche Herausforderungen vor dem Hintergrund der angestrebten zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeugflotten und im Bezug auf die Emissionsverlagerung zum Energiesektor. Die langfristige Wettbewerbsneutralität der künftigen CO₂-Regulierung ist auch dann sicherzustellen, wenn vielfältige konventionelle und elektrifizierte Antriebskonzepte im Markt konkurrieren. In diesem Kontext besteht ein weiterer Forschungsbedarf bezüglich des Rahmens der CO₂-Regulierung. So könnte zukünftig die Lebenszyklusbetrachtung verschiedener Antriebskonzepte eine objektive Nachhaltigkeitsbewertung liefern, unter Berücksichtigung nicht nur der nutzungsbedingten CO₂-Emission, sondern auch der Energieerzeugung sowie Fahrzeug- und Komponentenherstellung. Alternative Technologien lassen sich somit auf ihre tatsächliche Nachhaltigkeit gesamthaft evaluieren.

10 Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery Electric Vehicle
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CD	Charge-Depleting Modus
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CS	Charge-Sustaining Modus
ECE	Economic Commission for Europe
EEA	Europäische Umweltagentur – engl. European Environmental Agency
EPA	Environmental Protection Agency
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FTP	Federal Test Procedure
FVK	Faserverstärkte Kunststoffe
HCCI/CAI	Homogene Kompressionszündung
HWFET	Highway Fuel Economy Test
ika	Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University
KBA	Kraftfahrtbundesamt
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LPG	Liquified Natural Gas
MQB	Modularer Querbaukasten
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OEM	Original Equipment Manufacturer
PHEV	Plug-In-Hybrid Electric Vehicle
Pkw	Personenkraftwagen
REEV	Range Extended Electric Vehicle
SEG-1	Kleinst- und Kleinwagen
SEG-2	Mittelklasse, obere Mittelklasse, Mehrzweckfahrzeuge und Geländewagen
SEG-3	Oberklasse, Luxusklasse und Sportwagen
SOP	Produktionsstart – engl. Start of Production
SUV	Sport Utility Vehicle
TEG	Thermoelektrischer Generator
TP	Technologiepaket
UNECE	Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen Europa
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Testing Cycle
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Testing Procedure

11 Literatur

- [ABD11] AUTOBILD ONLINE
Europa schwächelt noch
<http://www.autobild.de/artikel/eu-automarkt-2011-2794482.html>
Abruf: 13.05.2013
- [ACE13] ACEA – EUROPEAN AUTOMOBILE MANUFACTURERS' ASSOCIATION
New Vehicle Registrations by Country
http://www.acea.be/news/news_detail/new_vehicle_registrations_by_country/
Abruf: 01.04.2014
- [ACE14] EDER, A.
ACEA – European Automobile Manufacturers' Association
IG WLTP Meeting, Wien, 2014
https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/17760285/WLTP-06-08e%20-%20Status%20report%20Utility%20factors%20_%20EU_ACEA.pdf?api=v2
Abruf: 01.04.2014
- [ACH11] ACHTERBERG, F.
Consultation on reducing CO₂ emissions from road vehicles
http://ec.europa.eu/clima/consultations/docs/0012/registered/greenpeace_contribution_en.pdf
Abruf: 02.07.2014
Greenpeace, Brüssel, 2011
- [ADA13] ADAC E.V.
ADAC - Autokosten
<http://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/default.aspx>
Abruf: 25.09.2013
- [AUT13] AUTOMOBILWOCHE
Keine Verschärfung durch die Hintertür
Automobilwoche 19 / 2013
Oberpfaffenhofen, 2013
- [BOS07] DIETSCHKE, K.H., KLINGEBIEL, M.
Kraftfahrtechnisches Taschenbuch
Hrsg: Robert Bosch GmbH, 26. Überarbeitete und ergänzte Auflage,
Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007
- [BOS13] BOSCH
Diesel-Marktüberblick von China bis USA
Presseinformationen
Bosch-Gruppe, Gerlingen, 2013

- [CUE99] CUENCA, R.M., GAINES, L.L., VYAS, A.D.
Evaluation of Electric Vehicle Production and Operating Costs
Illinois, 1999
- [DIE14] DIESELNET
Emission Standards: Japan Fuel Economy
<http://www.dieselnet.com/standards/jp/fe.php>
Abruf: 14.01.2014
- [ECK10] ECKSTEIN, L.
Unkonventionelle Fahrzeugantriebe
Schriftenreihe Automobiltechnik
Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University (ika), Aachen, 2010
- [ECK14] ECKSTEIN, L., URBAN, P.
Strukturentwurf von Kraftfahrzeugen
Schriftenreihe Automobiltechnik, 4. Auflage
Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University (ika), Aachen, 2014
- [EEA11] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA)
European Environment Agency (EEA)
CO₂-Monitoring from passenger cars 2010
<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/CO2-cars-emission-1>
Abruf: 13.05.2013
- [EEA14] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA)
CO₂-Monitoring from passenger cars 2013
<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/CO2-cars-emission-6>
Abruf: 16.05.2014
- [EEA14a] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA)
EEA greenhouse gas - data viewer
<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>
Abruf: 25.07.2014
- [EEX13] EUROPEAN ENERGY EXCHANGE (EEX)
EU Emission Allowances
<http://www.eex.com/de/Marktdaten/Handelsdaten/Emissionsrechte/EU%20Emission%20Allowances%20|%20Spotmarkt>
Abruf: 02.01.2014

- [EPA10] US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY
Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards – Final Rule
US Environmental Protection Agency, Washington, 2010
- [EPA12] US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY
Final Rulemaking for 2017 – 2025 Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards
Joint Technical Support Document
US Environmental Protection Agency, Washington, 2012
- [ERH14] ERHARD, J., ET AL.
Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland - Weichenstellungen bis 2050
http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Verbaendekonzzept_Klimafreundlicher_Verkehr.pdf
Abruf: 02.07.2014
WWF, BUND, Germanwatch, NABU, VCD, 2014
- [ERN10] ERNST, C.-S., OLSCHESKI, I., BIERMANN, J.-W.
Kurzstudie zum CO₂-Reduzierungspotenzial bei leichten Nutzfahrzeugen (N1) bis 2020
Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University, Aachen, 2010
- [ERN12] ERNST, C.-S., OLSCHESKI, I., ECKSTEIN, L.
CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020
Studie im Auftrag für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University, Aachen, 2012
<http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=552398.html>
- [ERN13] ERNST, C.-S., OLSCHESKI, I., ECKSTEIN, L., BRÖCKERHOFF, M.
CO₂-Reduzierungspotenzial bei leichten Nutzfahrzeugen N1 (bis 3,5 t) in Europa bis 2020
Studie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie e.V.
Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka), Aachen, 2013
- [EST13a] EUROSTAT
Statistikdatenbank Verkehr
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/transport/data/database>
Abruf: 01.04.2014
- [EST13b] EUROSTAT
Electricity prices for domestic consumers, from 2007 onwards - bi-annual data
Stand: September 2013

- [EUR04] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Richtlinie 2004/3/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 11. Februar 2004 zur Änderung der Richtlinien 70/156/EWG und 80/1268/EWG des Rates im Hinblick auf die Messung der Kohlendioxidemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen der Klasse N₁
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2004
- [EUR07] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Richtlinie 2007/46/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2007
- [EUR09] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2009
- [EUR11a] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050
Mitteilung der Kommission
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2011
- [EUR11b] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Weißbuch – Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem
Europäische Kommission
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2011
- [EUR11c] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Durchführungsverordnung (EU) Nr. 725/2011 der Kommission zur Einführung eines Verfahrens zur Genehmigung und Zertifizierung innovativer Technologien zur Verringerung CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen nach der Verordnung (EG) Nr. 443/2009
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2011
- [EUR11d] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Verordnung (EU) Nr. 510/2011 der Kommission
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2011
- [EUR12] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
UNECE Regelung Nr. 101 zur Messung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2012

- [EUR12a] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Statistik und Marktbeobachtungsstelle – Öl-Bulletin
http://ec.europa.eu/energy/observatory/oil/bulletin_de.htm
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2012
- [EUR13a] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Durchführungsbeschluss der Kommission über die Genehmigung des Systems der Motorraumkapselung von Daimler als innovative Technologie zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen gemäß der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2013
- [EUR13b] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Durchführungsbeschluss der Kommission über die Genehmigung des Wechselstromgenerators "Valeo Efficient Generation Alternator" als innovative Technologie zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen gemäß der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2013
- [EUR13c] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Durchführungsbeschluss der Kommission über die Genehmigung des Einsatzes von Leuchtdioden in bestimmten Beleuchtungsfunktionen eines Fahrzeuges der Kategorie M1 als innovative Technologie zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen gemäß der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2013
- [EUR13d] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Durchführungsbeschluss der Kommission zur Genehmigung des Systems von Bosch zur navigationsbasierten Vorkonditionierung des Batterieladezustands bei Hybridfahrzeugen als innovative Technologie zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen gemäß der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2013
- [EUR13e] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Die Mehrwertsteuersätze in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union,
Stand: 01. Juli 2013
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2013
- [EUR13f] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Committees Committee on the Environment, Public Health and Food Safety
Car CO₂ emissions: Environment Committee backs agreement with Council
Pressemitteilung: 17.12.2013
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2013

- [EUR14] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Betr.: Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen (erste Lesung) – Erklärungen der Kommission
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2014
- [EUR14a] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Committees Committee on the Environment, Public Health and Food Safety
CO₂ emissions: cleaner vans by 2020
Pressemitteilung: 14.01.2014
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2014
- [EUR14b] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen
Amtsblatt der Europäischen Union; hier: Art. 1, Ziffer 10 c)
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2014
- [EUR14c] EUROPÄISCHE UNION / EUROPÄISCHE KOMMISSION
Verordnung (EU) Nr. 253/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 510/2011 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer leichter Nutzfahrzeuge
Amtsblatt der Europäischen Union; hier: Art. 1, Ziffer 5 a)
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2014
- [EWR05] EWRINGMANN, D., BERGMANN, H., ET AL.
Emissionshandel im Verkehr
Ansätze für einen möglichen up-stream Handel im Verkehr
Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) Umweltforschungsplan Nr. 202 14 198
Köln, Heidelberg, Mannheim, Karlsruhe, März 2005
- [GOI14] GOVERNMENT OF INDIA PRESS
The Gazette of India
Regd. No. D. L.-33004/99 Part II-Section 3-Sub-section (ii)
Government of India Press, New Delhi, 2014

- [HAU05] HAUZINGER, H., ET AL.
Fahrleistungserhebung 2002 – Inlandsfahrleistung
Bericht zum Forschungsprojekt 82.201/2001
Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 120, 2005
- [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
- [ICC13] ICCT - THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION
http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_Brazil_InovarAuto_feb2013.pdf
Abruf: 12.03.2014
- [ICC13a] ICCT - THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION
European Vehicle Market Statistics
Pocketbook 2013
- [ICC14] ICCT - THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION
Global Passenger Vehicle Standards
<http://www.theicct.org/info-tools/global-passenger-vehicle-standards>
Abruf: 01.04.2014
- [IFE11] IFEU - INSTITUT FÜR ENERGIE UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH
Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemission des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 für die Emissionsberichterstattung 2012, Endbericht
IFEU, Heidelberg, 2011
- [IHS14] IHS – Automotive Resources
ehem. R.L. Polk
Div. Statistiken – nicht veröffentlichte Datensätze
- [JOC09] JOCHEM, P.
A CO2 Emission Trading Scheme for German Road Transport
assessing the impacts using a meso economic model with multi-agent attributes
Dissertation
Karlsruhe, Juli 2009
- [KAP12] KAPUS, P. E., PREVEDEL, K., BANDEL, W.
Potenziale von Motoren mit Variablem Verdichtungsverhältnis
in: MTZ – Motortechnische Zeitschrift, Ausgabe 05/2012
Springer Automotive Media, Wiesbaden, 2012

- [KBA11] KBA - KRAFTFAHRT-BUNDESAMT
Fachartikel Fahrzeugalter
Krafftahrt-Bundesamt (KBA), Flensburg, 2011
- [KBA12a] KBA - KRAFTFAHRT-BUNDESAMT
Privat und gewerblich zugelassene Personenkraftwagen (Pkw) – der kleine Unterschied
Krafftahrt-Bundesamt (KBA), Flensburg, 2012
- [KBA12b] KBA - KRAFTFAHRT-BUNDESAMT
Statistik - 11,5 Millionen „kompakte“ Pkw
http://www.kba.de/nn_212378/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Segmente/2010_0_b_segmente_kompakt_pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/2010_b_segmente_kompakt_pdf.pdf
Abruf: 13.05.2013
- [MAR14] MARKLINES
Automotive Industry Portal
http://www.marklines.com/en/regulation/environment/CO2_china
Abruf: 24.02.2014
- [MBT10] BAYER, M., HERZOG, S., SCHWARZ, M.
Trend Monitor 2010. Leichtes Nutzfahrzeug der Zukunft
MBtech Consulting GmbH, Sindelfingen, 2010
- [MCK09] MCKINSEY
Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland
Aktualisierte Energieszenarien und -sensitivitäten
Studie im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“
McKinsey&Company, 2009
- [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
- [MID10] FOLLMER, R., GRUSCHWITZ, D., JESKE, B., QUANDT, S., LENZ, B., NOBIS, C., KÖHLER, K., MEHLIN, M.
Mobilität in Deutschland 2008 – Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends
Studie des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und des Instituts für angewandte Sozialwissenschaft im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn und Berlin, 2010

- [MID12] MIDDENDORF, H., THEOBALD, J., LANG, L., HARTEL, K.
Der 1,4-l-TSI-Ottomotor mit Zylinderabschaltung
in: MTZ – Motortechnische Zeitschrift, Ausgabe 03/2012
Springer Automotive Media, Wiesbaden, 2012
- [MOC10] MOCK, P.
Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile
und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)
DLR, Stuttgart, 2010
- [POL12] R.L. POLK
Marktanalyse und Marktrohdaten für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) in Europa 2011
Individuelle Auswertung
R.L. Polk, Essen, 2012
- [REI10] REIF, K.
Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe
Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010
- [RIC11] RICARDO USA
Project report: computer simulation of light-duty vehicle technologies for green-
house gas emission reduction in the 2020-2025 timeframe
www.epa.gov/otaq/climate/documents/420r11020.pdf
Abruf: 21.03.2012
Ricardo, Detroit, 2011
- [RIC12] RICARDO – AEA; GIBSON, G., HILL, N.
Exploring possible car and van CO₂ emission targets for 2025 in Europe
Final Report for Greenpeace and Transport & Environment, 2012
Ricardo, UK, 2012
- [ROG62] ROGERS, E.
Diffusion of innovations
Glencoe, 1962
- [SAC14] STANDARD ADMINISTRATION OF CHINA
China National Standard GB 27999-2011
Standard Administration of China, Peking, 2014
- [SHA10] SHARPE, R.
EU Transport GHG: Routes to 2050?
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2010

- [SPI13] SPICHER, U.
Downsizing und Downsheading
in: van Basshuysen (Hrsg.): Ottomotor mit Direkteinspritzung
ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien
Wiesbaden, 2013
- [STE12] STEILER, G.
Studie: Junge Autokäufer wechseln häufig
kfz-betrieb Vogel
<http://www.kfz-betrieb.vogel.de/neuwagen/handel/articles/373365/>
Abruf: 25.09.2013
- [STV13] STEVEN, H.
Further modifications on the gearshift calculation tool
Präsentation vom 09.03.2013, WLTP Sub-group on the Development of the Harmonized driving Cycle (DHC), 17th Session
<https://www2.unece.org/wiki/display/trans/DHC+17th+session>
Abruf: 09.09.2013
- [SUE13] N.N.
EU-Staaten wollen CO₂-Handel reformieren
Süddeutsche.de vom 08.11.2013'
<http://www.sueddeutsche.de/news/politik/eu-staaten-beschliessen-klimaabkommen-in-der-luftfahrt-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-131005-99-01188>
Abruf: 02.01.2014
- [TNO11] TNO - NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR TOEGEPAST-NATUURWETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK
Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO₂ emissions from cars
TNO, Delft (Niederlande), 2011
- [TNO12] TNO - NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR TOEGEPAST-NATUURWETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK
Support for the revision on regulation on CO₂ emissions from light commercial vehicles
TNO, Delft (Niederlande), 2012
- [TUV05] STEVEN, H.
Untersuchungen für eine Änderung der EU Direktive 93/116/EC
TÜV Nord Mobilität GmbH & Co. KG, Würselen, 2005

- [T&E11] TRANSPORT&ENVIRONMENT
Reducing CO₂ emissions from road vehicles
<http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/2011%2012%20cars%20consultation%20response.pdf>
Abruf: 02.07.2014
- [ULM13] ULMER, T., HALL, F.
Report on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EC) No 443/2009 to define the modalities for reaching the 2020 target to reduce CO₂ emissions from new passenger cars
<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+REPORT+A7-2013-0151+0+DOC+PDF+V0//EN>
Abruf: 02.07.2014
- [UNE10] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM
India's Developing Automotive Fuel Economy Policy
http://www.unep.org/transport/gfei/autotool/case_studies/apacific/india/cs_ap_india.asp
Abruf: 23.01.2014
- [UNE13] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE
Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedures (WLTP)
Global Technical Regulation – Draft
<https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/5801176/26.08.2013%20Draft.pdf?api=v2>
Abruf: 01.11.2013
- [VDA04] WERMUTH, M.
Der Transportereinsatz im Betrieb
in: Nutzfahrzeuge: Mobile Zukunft. Dokumentation der IAA-Fachsymposien zur 60. IAA Nutzfahrzeuge in Hannover, 2004
- [VDA07] VDA - VERBAND DER DEUTSCHEN AUTOMOBILINDUSTRIE
Auto Jahresbericht 2007
VDA, Berlin, 2007
- [WAL11] WALLENTOWITZ, H., FREIALDENHOVEN, A., OLSCHESKI, I.
Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges – Technologien, Märkte und Implikationen
Vieweg+Teubner, Aachen, 2011
- [WVI12] WVI, IVT, DLR, KBA
Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010
<http://www.kid2010.de>
Braunschweig, 2012

12 Anhang I: Technologiebasis und Szenarienentwicklung bis 2030

12.1 Identifizierte Einzeltechnologien

12.1.1 Verbrennungsmotor

Bei der **Direkteinspritzung** wird durch das Einspritzen des Kraftstoffs in den Brennraum eine innere Gemischbildung ermöglicht. Der Kraftstoff verdampft direkt im Brennraum, wodurch geringere Verbrennungstemperaturen erzielt werden können. Dies reduziert beim Ottomotor die Klopfneigung während des Verbrennungsprozesses und ermöglicht hierdurch grundsätzlich eine höhere Verdichtung, was tendenziell zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch führt. Aufgrund des günstigeren Emissionsverhaltens des Motors wird eine **homogene** Direkteinspritzung bevorzugt, welche durch ein stöchiometrisches Luft-Kraftstoffgemisch charakterisiert ist [RIC11].

Downsizing beschreibt die Reduktion des Hubraums eines Motors bei gleichzeitiger Beibehaltung der Leistung, welche in der Regel durch eine Aufladung des Motors durch Abgasurbolader oder mechanisch angetriebene Kompressoren erreicht wird. Der Kraftstoffverbrauch sinkt dadurch, dass durch die kleinere Dimensionierung die innermotorische Reibung reduziert wird und der Lastpunkt des Motors häufiger in einen Kennfeldbereich mit höherem Wirkungsgrad angehoben werden kann [SPI13]. Im Rahmen dieser Studie wird Downsizing in unterschiedlichen Stufen abgebildet:

- **Stufe 1:** Benzin: Einfache Aufladung mit einer homogenen Direkteinspritzung. – Diesel: Standard in EU 2010.
- **Stufe 2:** Benzin: Zusätzlicher Einsatz einer vollvariablen Ventilsteuerung. – Diesel: Verbesserte Aufladungs- und Einspritzsysteme.
- **Stufe 3:** Benzin: Neue Aufladungskonzepte wie variable Turbinengeometrien oder mehrstufige Aufladungskonzepte. – Diesel: Neue Aufladungskonzepte und hinsichtlich Kühlung und Durchfluss optimierte AGR.

Bei der **gekühlten Abgasrückführung** (AGR) wird dem Kraftstoff-Luft-Gemisch eine bestimmte Menge Abgas zugemischt. Dadurch sinkt der Sauerstoffanteil im Brennraum und die Verbrennung verläuft langsamer und bei niedrigerer Temperatur, wodurch die Schadstoffemissionen sinken. Beim Ottomotor können insbesondere durch eine externe AGR die Drosselklappen weiter geöffnet werden, wodurch Strömungs- bzw. Ladungswechselverluste vermindert werden. Außerdem ermöglicht die Absenkung der Temperatur eine höhere Verdichtung (**Hochlast-AGR**) [BOS07].

Die **homogene Kompressionszündung (HCCI)** kombiniert die spezifischen Vorteile von Otto- und Dieselmotor, indem der HCCI-Motor je nach Lastanforderung als Selbst- oder Fremdzünder betrieben wird. In bestimmten Betriebszuständen wird ein homogenes Benzin-Luft-Gemisch bis zur kontrollierten Selbstzündung verdichtet. Ladungswechselverluste werden reduziert sowie eine günstige Niedrigtemperatur-Wärmefreisetzung ermöglicht. Die Technologie befindet sich derzeit noch in der Entwicklungsphase [RIC11].

Die **variable Verdichtung** ermöglicht ein effizienzoptimiertes Verdichtungsverhältnis. Mit dem Verdichtungsverhältnis steigt allgemein die Effizienz eines Motors an. Grenzen sind der Verdichtung dadurch gesetzt, dass es ab einem Punkt zu unkontrollierten spontanen Selbstzündungen kommt. Realisiert wird die dynamische Anpassung des Verdichtungsverhältnisses z.B. über eine exzentrische Kurbelwellenlagerung oder eine variable Länge der Pleuel [KAP12]. Die variable Verdichtung wurde bislang noch nicht bis zur Serienreife entwickelt.

Bei einem konventionellen Ventiltrieb liegen fixe Steuerzeiten vor. 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 verfügbar sind, womit Pump- und Drosselverluste eines Motors reduziert werden. Bei einer einfachen **variablen Ventilsteuerung** wird die zwei- oder mehrstufige Anpassung der Steuerzeiten ermöglicht. Bei der **vollvariablen Ventilsteuerung** wird neben einer variablen Öffnungs- und Schließcharakteristik auch die Anpassung der Ventilhübe realisiert. Es wird zwischen diskreten und kontinuierlichen Systemen unterschieden. Bei diskreten Systemen wählt ein hydraulisch oder elektromagnetisch aktuiertes mechanisches System zwischen zwei oder drei Nockenprofilen aus, während kontinuierliche Systeme eine stufenlose Verstellung ermöglichen [BOS07].

Bei der **Zylinderabschaltung** wird im Teillastbereich bei einem Teil der Zylinder kein Kraftstoff mehr eingespritzt. Eine Verbrauchsreduzierung wird hauptsächlich dadurch erreicht, dass die noch befeuerten Zylinder zur Kompensation der abgeschalteten Zylinder im Lastpunkt angehoben werden und dadurch in einem effizienteren Bereich arbeiten [MID12].

Die Closed-Loop-**Verbrennungssteuerung** wird bei Dieselmotoren eingesetzt. Drucksensoren, die z.B. in die Glühkerzen integriert sein können, überwachen dabei während des Verbrennungsprozesses zylinderindividuell den Druck im Brennraum. Dies ermöglicht eine Anpassung der Kraftstoffeinspritzung an die tatsächliche Verbrennung, wodurch diese effizienter verläuft und Schadstoff- und CO₂-Emissionen vermindert werden [RIC11].

12.1.2 Elektrifizierung des Antriebstrangs

Elektrifizierte Hybridfahrzeuge verwenden als Fahrzeugantrieb neben einem Verbrennungsmotor auch mindestens eine E-Maschine, die als Motor oder Generator betrieben werden kann, und einen Energiespeicher für elektrische Energie [RE110]. Der **Micro-Hybrid** ermöglicht eine Start-Stopp-Funktion (automatisches Abstellen des Motors im Stillstand und Einsparung der anfallenden Emissionen) und teilweise die Möglichkeit zum leichten regenerativen Bremsen.

Der **Mild-Hybrid** bietet die Möglichkeit des regenerativen Bremsens 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 **Full-Hybrid** ist gegenüber dem Mild-Hybrid in der Lage, kleinere Distanzen rein elektrisch zu fahren. Der **Plug-in-Hybrid** ermöglicht zudem, den Energiespeicher extern aufzuladen [ECK10].

12.1.3 Getriebe

Beim **Downspeeding** werden bestehende Getriebe weiter optimiert. 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. Dadurch werden Bereiche eines niedrigeren spezifischen Kraftstoffverbrauchs häufiger angefahren [SPI13].

Automatisierte Schaltgetriebe (ASG) 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 automatische Anfahren und Schalten. Geeignete Schaltstrategien unterstützen dabei eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen [BOS07].

Beim **stufenlosen Getriebe (CVT)** erfolgt eine Variation der Übersetzung stufenlos z.B. über Kegelscheiben und ein Gliederband oder eine Kette. Als Anfahrlement 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 wie bei konventionellen Schaltvorgängen entsteht [REI10].

Das **Doppelkupplungsgetriebe (DKG)** besteht aus zwei Teilgetrieben mit je einer Kupplung, welche automatisiert gesteuert werden. Eine Besonderheit des mechanischen Aufbaus besteht darin, dass die Getriebewelle in eine Vollwelle und eine umschließende Hohlwelle geteilt ist. Durch eine intelligente Betriebsstrategie ist neben dem im Eingriff befindenden Gang stets ein antizipierter als nächstes einzulegender Gang im zweiten inaktiven Teilgetriebe vorgewählt. Dadurch können Schaltvorgänge schnell, ohne Zugkraftverlust und mit sehr gutem Wirkungsgrad durchgeführt werden [REI10].

Durch die diskrete Gangwahl bei Handschaltgetrieben, Doppelkupplungsgetrieben oder Stufenautomaten kann der Motor nicht immer im optimalen Drehzahlbereich gehalten werden. Bei Konzepten mit einer höheren Gangzahl, z.B. **7-, 8- oder 9-Gang-Automatikgetrieben** wird eine sehr hohe Getriebespreizung ermöglicht, wodurch der Motor häufiger im optimalen Drehzahlbereich betrieben werden kann [RIC11].

12.1.4 Übergreifende Maßnahmen

Die **Reibungsverluste im Motor, Getriebe und Antriebsstrang** bieten ein weiteres Optimierungspotenzial. Durch eine Reduzierung dieser Reibung können Kraftstoff- und CO₂-Emissionseinsparungen ermöglicht werden. Dazu können eine Vielzahl kleinerer Maßnahmen wie reibungsreduzierende Beschichtungen und eine verringerte Viskosität der Schmierstoffe im Motorgehäuse beitragen, z.B. durch Einsatz von Leichtlaufölen [RIC11].

Traditionell werden die Nebenaggregate eines Motors mechanisch angetrieben. Eine **Elektrifizierung der Nebenaggregate** ermöglicht eine bedarfsgerechte Steuerung, bei der die Komponenten nur Energie verbrauchen, wenn sie benötigt werden. So kann z.B. bei kalten Temperaturen oder in der Warmlaufphase die Kühlwasserpumpe und der Kühlerlüfter abgeschaltet werden [EPA10].

Ein intelligentes **Thermomanagement** 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 [BOS07].

Eine große Menge der im Motor eingesetzten Kraftstoffenergie geht in Form von Wärme verloren. Durch Rückgewinnung bzw. Nutzung dieser Energie kann die Effizienz des Verbrennungsmotors gesteigert werden. Im **Rankine-Kreisprozess** nutzt ein Wärmeübertrager die Abgasenergie, um ein Arbeitsmedium zu verdampfen. Das Arbeitsmedium wird anschließend über eine Turbine expandiert und verrichtet dort mechanische Arbeit. Eine andere Möglichkeit der Wärmeenergie-Rückgewinnung stellt der **thermoelektrische Generator** dar. Er nutzt den sogenannten Seebeck-Effekt, bei dem mit Hilfe eines Temperaturgefälles in thermoelektrischen Halbleiterelementen eine elektrische Spannung erzeugt wird. Im Fahrzeug wird die notwendige Temperaturdifferenz bereitgestellt, indem das eine leitende Material mit heißem Abgas und das andere mit Umgebungsluft umströmt wird [SHA10].

12.1.5 Reduktion der Fahrwiderstände

Rollwiderstandsoptimierte Reifen stehen im Mittelpunkt des Zielkonflikts zwischen Sicherheit, Fahrkomfort und Energieeffizienz. Unter Beibehaltung der Reifendimensionen lässt sich der Rollwiderstand z.B. durch angepasste Reifenprofile oder durch innovative Werkstoffe bzw. Werkstoffmischungen weiter senken. Mit innovativen Reifendimensionen, z.B. schmale Lauffläche und großer Raddurchmesser kann eine weitere Optimierung erzielt werden [BOS07].

Maßnahmen, die auf die Verbesserung der **Aerodynamik** abzielen, wirken sich besonders bei hohen Geschwindigkeiten positiv aus. Einerseits kann die Optimierung auf einer inkrementellen Verbesserung von Komponenten, welche die Stirnfläche oder den Luftwiderstandsbeiwert definieren, beruhen. Andererseits kann ein ganzheitliches aerodynamisches Fahrzeugdesign, z.B. Wassertropfendesign, in der Fahrzeugkonzeptphase Einfluss finden [WAL11].

Durch **Leichtbau** in der Karosserie oder in Komponenten kann die Fahrzeugmasse reduziert werden. Die Masse des Fahrzeuges wirkt sich mit Ausnahme des Luftwiderstandes auf alle Fahrwiderstände aus und stellt deshalb einen wirkungsvollen Hebel zur Reduktion der CO₂-Emissionen dar. Verbesserungen der Karosserie oder von Komponenten beinhalten u.a. eine optimierte Stahlbauweise, den Einsatz von Aluminium- und Magnesium-Werkstoffen oder von faserverstärkten Kunststoffen [ECK14].

12.2 Zusammenstellung der Technologiepakete

Technologien		CO2-Einsparung 2030-real.		TP1	TP2K	TP2H	TP2 PHEV	TP3K	TP3H	TP3 PHEV	TP4K	TP4H	TP4 PHEV	TP5K	TP5H	TP5 PHEV
		B	D													
Motor	Direkteinspritzung, homogen	4,0%	-	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	Direkteinspritzung, Schichtladung	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Down sizing (Stufe 1)	5,5%	-	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Down sizing (Stufe 2)	9,0%	5,0%	-	B, D	B, D	B, D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Down sizing (Stufe 3)	18,0%	8,5%	-	-	-	-	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
	Down sizing 2020+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	B	B	B	B	B	B
	HCCI / CAI	11,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B	B	B
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	10,0%	1,5%	-	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	-	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	-	-	-	-	-	-	D	D	D	D	D	D
	AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	-	-	-	D	D	D	D	D	D	D	D	D
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	B, D	B, D	-	-	B, D	-	-	B, D	-	-	B, D	-	-
	Mid-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	B, D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	-	-	-	B, D	-	-	B, D	-	-	B, D	-
	Plug-in-Hybrid	60,0%	60,0%	-	-	-	B, D	-	-	B, D	-	-	B, D	-	-	B, D
Getriebe	Getriebeoptimierung / Downspeeding	3,5%	3,0%	-	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
	Automatisiertes Schaltgetriebe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stufenloses Getriebe (CVT)	4,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Doppelkupplungsgetriebe	6,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Übergreif. Maßnahmen	7/8/9-Gang-Automatik	-	-	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	3,5%	3,5%	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
	Thermomanagement	2,5%	2,5%	-	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	1,8%	1,8%	-	-	-	-	-	-	-	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
Fahrwiderstände	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	1,8%	1,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	3,5%	3,5%	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	B, D	B, D	B, D	B, D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Aerodynamik-Design	3,8%	3,8%	-	-	-	-	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	1,5%	B, D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	B, D	B, D	B, D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	-	-	-	-	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	-	-	-
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B, D	B, D	B, D
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	-	-	-	-	-	-	-	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D	B, D
Gewichtsangaben (Marktverteilung 2025 - realistisch)	rel. Gewichtsänderung [%]	-1,6%	-7,5%	-5,0%	1,0%	-12,8%	-8,3%	-4,3%	-12,9%	-8,4%	-4,4%	-16,7%	-12,2%	-8,2%		
	Abs. Gewichtsänderung [kg]	-26	-112	-78	41	-210	-152	-55	-237	-181	-81	-300	-246	-146		
	Flottengewicht [kg]	1.346	1.260	1.294	1.413	1.162	1.220	1.317	1.135	1.191	1.291	1.072	1.126	1.226		
2025	Konservativ	CO2-Einsparung [%]	18%	28%	31%	72%	35%	45%	75%	39%	49%	77%	x	x	x	
		CO2-Ausstoß [g/km]	114,8	101,3	97,6	39,7	91,9	77,4	34,9	86,3	72,3	32,2	x	x	x	
		Herstellkosten [€]	953	1.837	2.671	6.053	2.570	4.384	7.000	3.549	5.379	8.067	x	x	x	
	Realistisch	CO2-Einsparung [%]	20%	30%	33%	72%	38%	48%	76%	42%	52%	78%	x	x	x	
		CO2-Ausstoß [g/km]	112,6	98,8	94,5	38,7	87,5	73,4	33,9	81,6	68,0	31,3	x	x	x	
		Herstellkosten [€]	915	1.716	2.520	5.737	2.379	4.072	6.501	3.363	5.059	7.508	x	x	x	
	Progressiv	CO2-Einsparung [%]	21%	31%	35%	73%	40%	50%	77%	45%	55%	79%	x	x	x	
		CO2-Ausstoß [g/km]	110,3	96,3	91,5	37,7	84,2	70,1	32,7	77,0	63,9	30,1	x	x	x	
		Herstellkosten [€]	886	1.584	2.168	4.777	2.117	3.397	5.359	3.123	4.372	6.301	x	x	x	
2030	Konservativ	CO2-Einsparung [%]	18%	28%	31%	72%	35%	45%	75%	39%	49%	77%	43%	52%	79%	
		CO2-Ausstoß [g/km]	114,8	101,3	97,6	39,7	91,9	77,4	34,9	86,3	72,3	32,2	80,6	67,4	29,6	
		Herstellkosten [€]	953	1.837	2.565	5.582	2.570	4.191	6.508	3.520	5.156	7.537	4.139	5.758	8.236	
	Realistisch	CO2-Einsparung [%]	21%	31%	35%	73%	40%	50%	77%	44%	54%	79%	48%	57%	80%	
		CO2-Ausstoß [g/km]	110,3	96,3	91,5	37,7	84,7	70,5	32,8	78,9	65,2	30,2	72,5	60,0	27,6	
		Herstellkosten [€]	915	1.682	2.364	5.197	2.272	3.749	5.877	3.255	4.736	6.881	4.019	5.452	7.620	
	Progressiv	CO2-Einsparung [%]	25%	35%	39%	74%	44%	54%	78%	49%	58%	80%	53%	62%	81%	
		CO2-Ausstoß [g/km]	105,9	91,6	85,9	35,8	78,8	64,7	30,6	71,9	58,8	28,1	65,9	54,0	26,1	
		Herstellkosten [€]	886	1.571	2.098	4.568	2.026	3.207	5.070	3.032	4.184	6.016	3.912	5.007	6.829	

Abb. 12-1: Konsolidierte Übersicht der Technologiepakete

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real.}		TP1		TP2K		TP2H		TP2REEV		TP3K		TP3H		TP3REEV		
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	
Motor	Direkteinspritzung, homogen	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	Direkteinspritzung, Schichtladung	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Downsizing (Stufe 1)	4,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Downsizing (Stufe 2)	8,0%	5,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	
	Downsizing (Stufe 3)	17,0%	8,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	HCCI/ CAI	10,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ventilsteuerung - vollvariabel	9,0%	1,5%	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓		
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	
	Mid-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	
	Plug-in-Hybrid	73,5%	73,5%	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	
Getriebe	Getriebeoptimierung / Downsizing	3,5%	3,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Automatisiertes Schaltgetriebe	3,3%	3,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Stufenloses Getriebe (CVT)	4,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Doppelkupplungsgetriebe	6,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7/8/9-Gang-Automatik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Übergreif. Maßn.	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	3,0%	3,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Thermomanagement	2,5%	2,5%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Fahrwiderstände	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Aerodynamik-Design	3,8%	3,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	1,5%	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			-1,6	-1,5	-7,5	-8,0	-5,0	-5,5	11,0	10,5	-12,8	-13,3	-8,3	-8,8	5,7	5,3	
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			-17	-18	-80	-96	-53	-66	117	125	-137	-158	-89	-104	61	63	
	Flottengewicht [kg]			1.050	1.176	987	1.098	1.014	1.128	1.184	1.319	930	1.036	978	1.090	1.128	1.257	
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	19,6	14,9	28,6	25,1	31,9	27,4	80,1	78,9	32,8	32,0	43,7	42,4	81,3	80,9		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	102	94	91	83	86	81	25	23	85	75	72	64	24	21		
		Herstellkosten [€]	995	686	1.965	1.267	3.015	2.169	9.265	8.587	2.565	1.936	4.615	3.692	9.865	9.256		
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	19,6	14,9	28,6	25,1	31,9	27,4	80,1	78,9	32,8	32,0	43,7	42,4	81,3	80,9		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	102	94	91	83	86	81	25	23	85	75	72	64	24	21		
		Herstellkosten [€]	995	686	1.965	1.267	3.015	2.169	9.265	8.587	2.565	1.936	4.615	3.692	9.865	9.256		
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	19,6	14,9	28,6	25,1	31,9	27,4	80,1	78,9	32,8	32,0	43,7	42,4	81,3	80,9		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	102	94	91	83	86	81	25	23	85	75	72	64	24	21		
		Herstellkosten [€]	942	650	1.804	1.174	2.622	1.872	7.592	6.981	2.263	1.716	3.901	3.113	8.052	7.523		
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	19,6	14,9	28,6	25,1	31,9	27,4	80,1	78,9	32,8	32,0	43,7	42,4	81,3	80,9		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	102	94	91	83	86	81	25	23	85	75	72	64	24	21		
		Herstellkosten [€]	995	686	1.965	1.267	2.814	1.993	7.925	7.247	2.565	1.936	4.271	3.389	8.525	7.916		
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	21,2	16,5	30,1	27,4	33,7	30,2	80,5	79,6	34,6	34,7	45,6	45,0	81,9	81,7		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	100	93	89	81	84	77	25	23	83	72	69	61	23	20		
		Herstellkosten [€]	956	660	1.827	1.192	2.645	1.890	7.511	6.894	2.321	1.759	3.961	3.157	8.004	7.461		
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	22,9	18,1	31,6	29,6	35,5	32,9	80,9	80,2	36,4	37,4	47,4	47,4	82,4	82,4		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	98	91	87	78	82	74	24	22	81	70	67	58	22	20		
		Herstellkosten [€]	925	639	1.675	1.111	2.272	1.616	6.213	5.666	2.010	1.536	3.262	2.596	6.547	6.092		
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	19,6	14,9	28,6	25,1	31,9	27,4	80,1	78,9	32,8	32,0	43,7	42,4	81,3	80,9		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	102	94	91	83	86	81	25	23	85	75	72	64	24	21		
		Herstellkosten [€]	995	686	1.965	1.267	2.708	1.899	7.277	6.599	2.565	1.936	4.089	3.229	7.877	7.268		
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	22,9	18,1	31,6	29,6	35,5	32,9	80,9	80,2	36,4	37,4	47,4	47,4	82,4	82,4		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	98	91	87	78	82	74	24	22	81	70	67	58	22	20		
		Herstellkosten [€]	956	660	1.783	1.174	2.479	1.766	6.770	6.180	2.208	1.680	3.639	2.895	7.195	6.686		
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	26,1	21,2	34,4	33,9	38,8	38,0	81,7	81,4	39,7	42,3	50,8	52,1	83,3	83,3		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	94	88	83	73	78	69	23	21	77	64	62	53	21	18		
		Herstellkosten [€]	925	639	1.655	1.107	2.196	1.562	5.922	5.392	1.915	1.469	3.069	2.443	6.181	5.754		

Abb. 12-2: Technologiepakete für Pkw SEG-1 (I / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real.}		TP4K		TP4H		TP4REEV		TP5K		TP5H		TP5REEV	
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Motor	Direkteinspritzung, homogen	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Direkteinspritzung, Schichtladung	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 1)	4,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 2)	8,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 3)	17,0%	8,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HCCI / CAI	10,0%	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	9,0%	1,5%	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	
	Mild-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	
	Plug-in-Hybrid	73,5%	73,5%	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	
Getriebe	Getriebeoptimierung / Dow nspeeding	3,5%	3,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Automatisiertes Schaltgetriebe	3,3%	3,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Stufenloses Getriebe (CVT)	4,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Doppelkupplungsgetriebe	6,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7/8/9-Gang-Automatik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Übergreif. Maßn.	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	3,0%	3,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Thermomanagement	2,5%	2,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Fahrwiderstände	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Aerodynamik-Design	3,8%	3,8%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			-14,4	-14,9	-9,9	-10,4	4,1	3,7	-18,4	-18,9	-13,9	-14,4	0,1	-0,4
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			-154	-177	-106	-124	44	44	-196	-225	-148	-171	1	-4
	Flottengewicht [kg]			913	1.017	961	1.070	1.111	1.238	871	969	919	1.023	1.068	1.190
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	34,9	34,6	45,5	45,7	82,0	81,6	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	83	73	69	60	23	20	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	3.215	2.950	4.921	4.631	9.175	8.885	x	x	x	x	x	x	x
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	36,6	37,2	47,3	48,4	82,4	82,4	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	80,6	69,7	67,0	57,3	22,3	19,6	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	2.980	2.758	4.620	4.374	8.663	8.418	x	x	x	x	x	x	x
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	38,2	39,8	48,9	50,9	82,9	83,1	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	79	67	65	54	22	19	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	2.679	2.515	3.931	3.744	7.217	7.029	x	x	x	x	x	x	x
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	34,9	34,6	45,5	45,7	82,0	81,6	40,1	36,7	50,0	47,4	83,4	82,2	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	83	73	69	60	23	20	76	70	63	58	21	20	
		Herstellkosten [€]	3.215	2.950	4.739	4.449	8.527	8.237	4.065	3.300	5.589	4.799	9.377	8.587	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	38,2	39,8	48,9	50,9	82,9	83,1	42,9	41,6	53,0	52,5	84,2	83,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	79	67	65	54	22	19	72,5	64,8	59,7	52,7	20	18	
		Herstellkosten [€]	2.870	2.671	4.300	4.078	7.856	7.634	3.873	3.184	5.303	4.591	8.859	8.146	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	41,1	44,5	52,0	55,7	83,7	84,4	45,5	46,3	55,7	57,1	85,0	84,9	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	75	62	61	49	21	17	69	60	56	48	19	17	
		Herstellkosten [€]	2.584	2.439	3.739	3.571	6.851	6.683	3.719	3.091	4.873	4.223	7.985	7.335	

Abb. 12-3: Technologiepakete für Pkw SEG-1 (II / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real.}		TP1		TP2K		TP2H		TP2PHEV		TP3K		TP3H		TP3PHEV	
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Motor	Direkteinspritzung, homogen	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Direkteinspritzung, Schichtladung	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 1)	5,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 2)	9,0%	5,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 3)	18,0%	8,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HCCI / CAI	11,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	10,0%	1,5%	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-
	Mid-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-
	Plug-in-Hybrid	60,0%	60,0%	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓
Getriebe	Getriebeoptimierung / Downsizing	3,5%	3,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Automatisiertes Schaltgetriebe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stufenloses Getriebe (CVT)	4,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Doppelkupplungsgetriebe	6,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Übergreif. Maßnahmen	7/8/9-Gang-Automatik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Thermomanagement	2,5%	2,5%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	1,8%	1,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fahrwiderstände	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	1,8%	1,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Aerodynamik-Design	3,8%	3,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	1,5%	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			-1,6	-1,5	-7,5	-8,0	-5,0	-5,5	1,0	0,5	-12,8	-13,3	-8,3	-8,8	-4,3	-4,8
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			-22	-24	-105	-126	-70	-87	14	8	-179	-208	-116	-138	-60	-75
	Flottengewicht [kg]			1.374	1.549	1.291	1.447	1.326	1.486	1.410	1.581	1.217	1.365	1.280	1.435	1.336	1.498
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	20,6	15,3	32,5	24,0	35,5	26,3	71,6	67,7	36,0	31,0	45,4	42,7	73,2	70,7	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	126	123	107	110	102	107	45	47	102	100	87	83	43	42	
		Herstellkosten [€]	1.145	875	2.295	1.635	3.415	2.735	6.465	5.785	3.045	2.535	5.535	5.035	7.215	6.685	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	20,6	15,3	32,5	24,0	35,5	26,3	71,6	67,7	36,0	31,0	45,4	42,7	73,2	70,7	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	126	123	107	110	102	107	45	47	102	100	87	83	43	42	
		Herstellkosten [€]	1.145	875	2.295	1.635	3.415	2.735	6.465	5.785	3.045	2.535	5.535	5.035	7.215	6.685	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	20,6	15,3	32,5	24,0	35,5	26,3	71,6	67,7	36,0	31,0	45,4	42,7	73,2	70,7	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	126	123	107	110	102	107	45	47	102	100	87	83	43	42	
		Herstellkosten [€]	1.084	829	2.107	1.513	2.978	2.365	5.387	4.774	2.687	2.241	4.680	4.242	5.966	5.502	
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	20,6	15,3	32,5	24,0	35,5	26,3	71,6	67,7	36,0	31,0	45,4	42,7	73,2	70,7	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	126	123	107	110	102	107	45	47	102	100	87	83	43	42	
		Herstellkosten [€]	1.145	875	2.295	1.635	3.200	2.520	5.668	4.988	3.045	2.535	5.119	4.619	6.418	5.888	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	22,3	16,9	34,1	25,9	37,4	28,8	72,3	68,5	37,9	33,5	47,3	45,3	74,0	71,8	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	124	120	105	107	99	103	44	46	99	96	84	79	41	41	
		Herstellkosten [€]	1.100	841	2.135	1.536	3.007	2.389	5.352	4.734	2.756	2.299	4.750	4.302	5.972	5.497	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	24,0	18,5	35,7	27,9	39,3	31,2	72,9	69,4	39,7	35,8	49,2	47,7	74,8	72,8	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	121	118	102	105	97	100	43	44	96	93	81	76	40	39	
		Herstellkosten [€]	1.065	815	1.957	1.430	2.592	2.047	4.499	3.953	2.386	1.999	3.913	3.532	4.928	4.522	
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	20,6	15,3	32,5	24,0	35,5	26,3	71,6	67,7	36,0	31,0	45,4	42,7	73,2	70,7	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	126	123	107	110	102	107	45	47	102	100	87	83	43	42	
		Herstellkosten [€]	1.145	875	2.295	1.635	3.086	2.406	5.282	4.602	3.045	2.535	4.899	4.399	6.032	5.502	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	24,0	18,5	35,7	27,9	39,3	31,2	72,9	69,4	39,7	35,8	49,2	47,7	74,8	72,8	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	121	118	102	105	97	100	43	44	96	93	81	76	40	39	
		Herstellkosten [€]	1.100	841	2.084	1.513	2.825	2.235	4.887	4.296	2.622	2.192	4.365	3.942	5.425	4.975	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	27,1	21,6	38,7	31,6	42,7	35,8	74,3	70,9	43,1	40,3	52,6	52,3	76,3	74,7	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	116	114	97	99	91	93	41	42	90	87	75	69	38	37	
		Herstellkosten [€]	1.065	815	1.935	1.424	2.509	1.980	4.316	3.787	2.275	1.907	3.685	3.323	4.656	4.269	

Abb. 12-4: Technologiepakete für Pkw SEG-2 (I / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real.}		TP4K		TP4H		TP4PHEV		TP5K		TP5H		TP5PHEV	
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Motor	Direkteinspritzung, homogen	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Direkteinspritzung, Schichtladung	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 1)	5,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 2)	9,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 3)	18,0%	8,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	HCCI / CAI	11,0%	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	10,0%	1,5%	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-
	Mild-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-
	Plug-in-Hybrid	60,0%	60,0%	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓
Getriebe	Getriebeoptimierung / Dow nspeeding	3,5%	3,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Automatisiertes Schaltgetriebe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stufenloses Getriebe (CVT)	4,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Doppelkupplungsgetriebe	6,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Übergreif. Maßnahmen	7/8/9-Gang-Automatik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Thermomanagement	2,5%	2,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	1,8%	1,8%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fahrwiderstände	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	1,8%	1,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Aerodynamik-Design	3,8%	3,8%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			-12,9	-13,9	-8,4	-9,4	-4,4	-5,4	-16,7	-17,9	-12,2	-13,4	-8,2	-9,4
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			-180	-218	-117	-147	-61	-84	-233	-281	-170	-210	-114	-147
	Flottengewicht [kg]			1.216	1.355	1.279	1.426	1.335	1.489	1.163	1.292	1.226	1.363	1.282	1.426
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	40,0	35,9	49,9	46,8	74,9	72,8	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	95	93	80	77	40	39	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	4.295	3.735	6.399	5.819	7.668	7.088	x	x	x	x	x	x	x
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	41,7	38,5	51,6	49,4	75,7	73,9	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	93	89	77	73	39	38	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	4.017	3.507	6.039	5.511	7.234	6.705	x	x	x	x	x	x	x
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	43,2	41,0	53,2	52,0	76,3	75,0	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	90	85	74	70	38	36	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	3.659	3.217	5.211	4.750	6.201	5.740	x	x	x	x	x	x	x
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	40,0	35,9	49,9	46,8	74,9	72,8	44,9	37,9	54,1	48,4	77,0	73,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	95	93	80	77	40	39	88	90	73	75	36	38	
		Herstellkosten [€]	4.095	3.735	5.979	5.599	7.082	6.702	5.170	4.085	7.054	5.949	8.157	7.052	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	43,2	41,0	53,2	52,0	76,3	75,0	47,7	42,9	57,0	53,5	78,2	75,8	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	90	85	74	70	38	36	83	83	68	67	35	35	
		Herstellkosten [€]	3.886	3.402	5.656	5.153	6.688	6.185	4.952	3.953	6.722	5.704	7.755	6.736	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	46,2	45,8	56,2	56,8	77,6	77,0	50,2	47,5	59,5	58,1	79,3	77,7	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	86	79	70	63	36	33	79	76	64	61	33	32	
		Herstellkosten [€]	3.548	3.125	4.982	4.541	5.929	5.487	4.778	3.848	6.213	5.264	7.159	6.210	

Abb. 12-5: Technologiepakete für Pkw SEG-2 (II / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real.}		TP1		TP2K		TP2H		TP2PHEV		TP3K		TP3H		TP3PHEV	
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Motor	Direkteinspritzung, homogen	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Direkteinspritzung, Schichtladung	6,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 1)	6,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 2)	10,0%	5,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 3)	19,0%	8,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HCCI / CAI	12,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	11,0%	1,5%	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-
	Mid-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-
	Plug-in-Hybrid	60,0%	60,0%	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓
Getriebe	Getriebeoptimierung / Downsizing	3,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Automatisiertes Schaltgetriebe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stufenloses Getriebe (CVT)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Übergreif. Maßnahmen	Doppelkupplungsgetriebe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7/8/9-Gang-Automatik	7,0%	6,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	4,0%	4,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Thermomanagement	2,5%	2,5%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	1,8%	1,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fahrwiderstände	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	1,8%	1,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Aerodynamik-Design	3,8%	3,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	1,5%	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			-1,6	-1,5	-7,5	-8,0	-5,0	-5,5	0,0	-0,5	-12,8	-13,3	-8,3	-8,8	-5,3	-5,8
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			-26	-27	-123	-144	-82	-99	0	-9	-209	-238	-136	-157	-87	-103
	Flottengewicht [kg]			1.609	1.768	1.512	1.651	1.553	1.696	1.635	1.786	1.426	1.557	1.499	1.638	1.548	1.692
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	26,5	20,7	35,7	28,8	38,5	31,0	72,9	69,7	38,6	35,3	48,7	46,3	74,4	72,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	157	130	137	117	131	113	58	50	131	106	109	88	55	45	
		Herstellkosten [€]	1.425	1.085	2.675	1.975	3.750	3.050	7.400	6.700	3.595	3.015	6.170	5.590	8.320	7.740	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	26,5	20,7	35,7	28,8	38,5	31,0	72,9	69,7	38,6	35,3	48,7	46,3	74,4	72,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	157	130	137	117	131	113	58	50	131	106	109	88	55	45	
		Herstellkosten [€]	1.425	1.085	2.675	1.975	3.750	3.050	7.400	6.700	3.595	3.015	6.170	5.590	8.320	7.740	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	26,5	20,7	35,7	28,8	38,5	31,0	72,9	69,7	38,6	35,3	48,7	46,3	74,4	72,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	157	130	137	117	131	113	58	50	131	106	109	88	55	45	
		Herstellkosten [€]	1.346	1.024	2.456	1.825	3.284	2.653	6.173	5.542	3.171	2.665	5.231	4.724	6.889	6.382	
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	26,5	20,7	35,7	28,8	38,5	31,0	72,9	69,7	38,6	35,3	48,7	46,3	74,4	72,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	157	130	137	117	131	113	58	50	131	106	109	88	55	45	
		Herstellkosten [€]	1.425	1.085	2.675	1.975	3.535	2.835	6.498	5.798	3.595	3.015	5.740	5.160	7.418	6.838	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	28,0	22,2	37,1	30,6	40,2	33,3	73,5	70,5	40,3	37,6	50,5	48,7	75,1	73,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	153	128	134	114	127	109	56	48	127	102	105	84	53	43	
		Herstellkosten [€]	1.366	1.041	2.489	1.854	3.318	2.683	6.135	5.500	3.253	2.734	5.315	4.796	6.899	6.380	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	29,5	23,7	38,5	32,4	41,8	35,6	74,1	71,3	41,9	39,8	52,1	51,0	75,8	74,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	150	125	131	111	124	106	55	47	124	99	102	80	52	42	
		Herstellkosten [€]	1.317	1.003	2.282	1.721	2.876	2.316	5.164	4.603	2.817	2.376	4.393	3.953	5.699	5.258	
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	26,5	20,7	35,7	28,8	38,5	31,0	72,9	69,7	38,6	35,3	48,7	46,3	74,4	72,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	157	130	137	117	131	113	58	50	131	106	109	88	55	45	
		Herstellkosten [€]	1.425	1.085	2.675	1.975	3.421	2.721	6.061	5.361	3.595	3.015	5.512	4.932	6.981	6.401	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	29,5	23,7	38,5	32,4	41,8	35,6	74,1	71,3	41,9	39,8	52,1	51,0	75,8	74,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	150	125	131	111	124	106	55	47	124	99	102	80	52	42	
		Herstellkosten [€]	1.364	1.039	2.431	1.824	3.129	2.522	5.608	5.001	3.096	2.607	4.897	4.407	6.273	5.784	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	32,5	26,6	41,1	35,9	44,9	39,9	75,3	72,8	45,0	44,0	55,2	55,3	77,1	76,2	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	144	120	125	105	117	99	53	45	117	92	95	73	49	39	
		Herstellkosten [€]	1.317	1.003	2.258	1.714	2.791	2.248	4.957	4.414	2.686	2.268	4.141	3.723	5.385	4.968	

Abb. 12-6: Technologiepakete für Pkw SEG-3 (I / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real}		TP4K		TP4H		TP4PHEV		TP5K		TP5H		TP5PHEV	
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Motor	Direkteinspritzung, homogen	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Direkteinspritzung, Schichtladung	6,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 1)	6,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 2)	10,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 3)	19,0%	8,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	HCCI / CAI	12,0%	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	11,0%	1,5%	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-
	Mild-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-
	Plug-in-Hybrid	60,0%	60,0%	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓
Getriebe	Getriebeoptimierung / Dow nspeeding	3,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Automatisiertes Schaltgetriebe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stufenloses Getriebe (CVT)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Doppelkupplungsgetriebe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7/8/9-Gang-Automatik	7,0%	6,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Übergreif. Maßnahmen	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	4,0%	4,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Thermomanagement	2,5%	2,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	1,8%	1,8%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	1,8%	1,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fahrwiderstände	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Aerodynamik-Design	3,8%	3,8%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			-12,9	-13,9	-8,4	-9,4	-5,4	-6,4	-16,7	-17,9	-12,2	-13,4	-9,2	-10,4
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			-211	-249	-137	-168	-88	-114	-273	-320	-199	-240	-150	-186
	Flottengewicht [kg]			1.424	1.546	1.498	1.627	1.547	1.681	1.362	1.475	1.436	1.555	1.485	1.609
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	43,4	39,8	52,8	50,1	76,4	74,5	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	121	99	101	82	50	42	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	5.005	4.345	7.150	6.490	8.828	8.168	x	x	x	x	x	x	x
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	44,9	42,3	54,3	52,6	77,0	75,5	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	117	95	97	78	49	40	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	4.674	4.075	6.736	6.136	8.320	7.720	x	x	x	x	x	x	x
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	46,3	44,7	55,8	55,0	77,7	76,5	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	114	91	94	74	48	38	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	4.248	3.728	5.825	5.304	7.130	6.610	x	x	x	x	x	x	x
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	43,4	39,8	52,8	50,1	76,4	74,5	48,1	41,7	56,8	51,7	78,4	75,3	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	121	99	101	82	50	42	111	96	92	79	46	41	
		Herstellkosten [€]	5.005	4.345	6.922	6.262	8.391	7.731	5.905	4.695	7.822	6.612	9.291	8.081	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	46,3	44,7	55,8	55,0	77,7	76,5	50,6	46,4	59,4	56,4	79,5	77,3	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	114	91	94	74	48	38	105	88	86	72	44	37	
		Herstellkosten [€]	4.519	3.949	6.319	5.749	7.695	7.126	5.648	4.538	7.449	6.339	8.825	7.715	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	49,0	49,2	58,5	59,4	78,8	78,4	52,9	50,7	61,7	60,7	80,5	79,1	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	109	83	88	67	45	35	100	81	82	64	42	34	
		Herstellkosten [€]	4.118	3.620	5.572	5.074	6.817	6.319	5.444	4.414	6.898	5.868	8.143	7.113	

Abb. 12-7: Technologiepakete für Pkw SEG-3 (II / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real}		TP1		TP2K		TP2H		TP2REEV		TP3K		TP3H		TP3REEV	
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Motor	Direkteinspritzung, homogen	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Direkteinspritzung, Schichtladung	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 1)	4,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 2)	8,0%	5,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 3)	17,0%	8,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HCCI / CAI	10,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	9,0%	1,5%	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-
	Mild-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-
	Plug-in-Hybrid	73,5%	73,5%	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓
Getriebe	Getriebeoptimierung / Dow nspeeding	3,5%	3,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Automatisiertes Schaltgetriebe	3,3%	3,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stufenloses Getriebe (CVT)	4,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Doppelkupplungsgetriebe	6,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7/8/9-Gang-Automatik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Übergreif. Maßnahmen	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	3,0%	3,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Thermomanagement	2,5%	2,3%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Fahrowiderstände	Rollw iderstandsreduzierte Reifen	2,8%	2,8%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Aerodynamik-Design	2,0%	2,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	1,5%	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			-1,6	-1,5	-7,5	-8,0	-5,2	-5,5	11,0	10,5	-12,8	-13,2	-8,3	-8,7	5,7	5,3
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			-19	-19	-86	-98	-59	-68	125	129	-146	-162	-94	-107	65	65
	Flottengewicht [kg]			1.121	1.206	1.054	1.127	1.081	1.157	1.265	1.354	994	1.063	1.046	1.118	1.205	1.290
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	19,6	14,9	28,6	24,7	31,9	27,0	80,1	78,8	32,4	31,0	42,2	41,6	81,2	80,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	120	98	106	87	101	84	30	24	101	79	86	67	28	22	
		Herstellkosten [€]	1.015	790	2.395	1.870	3.445	2.895	9.795	9.245	3.695	3.280	5.715	5.275	11.095	10.655	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	19,6	14,9	28,6	24,7	31,9	27,0	80,1	78,8	32,4	31,0	42,2	41,6	81,2	80,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	120	98	106	87	101	84	30	24	101	79	86	67	28	22	
		Herstellkosten [€]	1.015	790	2.395	1.870	3.445	2.895	9.795	9.245	3.695	3.280	5.715	5.275	11.095	10.655	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	19,6	14,9	28,6	24,7	31,9	27,0	80,1	78,8	32,4	31,0	42,2	41,6	81,2	80,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	120	98	106	87	101	84	30	24	101	79	86	67	28	22	
		Herstellkosten [€]	961	748	2.192	1.721	3.009	2.515	8.060	7.566	3.219	2.864	4.831	4.452	9.088	8.709	
	2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	19,6	14,9	28,6	24,7	31,9	27,0	80,1	78,8	32,4	31,0	42,2	41,6	81,2	80,6
			CO ₂ -Ausstoß [g/km]	120	98	106	87	101	84	30	24	101	79	86	67	28	22
			Herstellkosten [€]	1.015	790	2.395	1.870	3.244	2.694	8.438	7.888	3.695	3.280	5.371	4.931	9.738	9.298
Trend		CO ₂ -Einsparung [%]	21,0	16,2	29,9	26,8	33,6	29,7	80,4	79,4	33,9	33,4	43,8	43,8	81,7	81,3	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	118	96	104	84	99	81	29	24	99	77	84	65	27	22	
		Herstellkosten [€]	975	759	2.225	1.751	3.043	2.545	7.987	7.490	3.313	2.947	4.925	4.536	9.075	8.686	
Progressiv		CO ₂ -Einsparung [%]	22,4	17,4	31,2	28,9	35,1	32,2	80,8	80,0	35,4	35,6	45,4	46,0	82,1	81,9	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	116	95	103	82	97	78	29	23	96	74	81	62	27	21	
		Herstellkosten [€]	944	735	2.030	1.617	2.627	2.191	6.631	6.195	2.813	2.513	4.040	3.717	7.414	7.091	
2030		Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	19,6	14,9	28,6	24,7	31,9	27,0	80,1	78,8	32,4	31,0	42,2	41,6	81,2	80,6
			CO ₂ -Ausstoß [g/km]	120	98	106	87	101	84	30	24	101	79	86	67	28	22
			Herstellkosten [€]	1.015	790	2.395	1.870	3.138	2.588	7.781	7.231	3.695	3.280	5.189	4.749	9.081	8.641
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	22,4	17,4	31,2	28,9	35,1	32,2	80,8	80,0	35,4	35,6	45,4	46,0	82,1	81,9	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	116	95	103	82	97	78	29	23	96	74	81	62	27	21	
		Herstellkosten [€]	975	759	2.169	1.720	2.865	2.393	7.226	6.753	3.126	2.786	4.530	4.167	8.182	7.819	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	25,1	19,9	33,7	32,9	38,2	37,1	81,5	81,1	38,2	40,0	48,3	50,1	82,9	83,1	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	112	92	99	77	92	72	28	22	92	69	77	57	25	19	
		Herstellkosten [€]	944	735	2.010	1.612	2.550	2.130	6.336	5.916	2.651	2.373	3.781	3.480	6.977	6.677	

Abb. 12-8: Technologiepakete für LNF Gruppe I (I / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real.}		TP4K		TP4H		TP4REEV		TP5K		TP5H		TP5REEV	
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Motor	Direkteinspritzung, homogen	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Direkteinspritzung, Schichtladung	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 1)	4,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 2)	8,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 3)	17,0%	8,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Gekühlte/ Hochlast-AGR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HCCI/ CAI	10,0%	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	9,0%	1,5%	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-
	Mid-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-
	Plug-in-hybrid	73,5%	73,5%	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓
Getriebe	Getriebeoptimierung / Downsizing	3,5%	3,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Automatisiertes Schaltgetriebe	3,3%	3,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stufenloses Getriebe (CVT)	4,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Doppelkupplungsgetriebe	6,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Übergreif. Maßnahmen	7/8/9-Gang-Automatik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	3,0%	3,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Thermomanagement	2,5%	2,3%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fahrwiderstände	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	2,8%	2,8%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Aerodynamik-Design	2,0%	2,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			-14,4	-14,9	-9,9	-10,3	4,1	3,7	-18,3	-18,9	-13,7	-14,3	0,3	-0,3
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			-165	-182	-113	-127	47	45	-208	-231	-156	-176	3	-4
	Flottengewicht [kg]			975	1.043	1.027	1.098	1.187	1.270	932	994	984	1.049	1.143	1.221
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	34,5	33,7	45,2	44,9	81,8	81,3	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	98	76	82	63	27	21	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	4.345	4.030	6.051	5.711	10.388	10.048	x	x	x	x	x	x	x
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	35,9	35,9	46,7	47,3	82,2	82,0	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	96	74	79	61	26	21	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	3.974	3.709	5.614	5.325	9.736	9.447	x	x	x	x	x	x	x
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	37,2	38,1	48,1	49,6	82,6	82,6	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	94	71	77	58	26	20	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	3.486	3.286	4.738	4.515	8.087	7.864	x	x	x	x	x	x	x
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	34,5	33,7	45,2	44,9	81,8	81,3	39,8	35,8	49,7	46,7	83,3	81,9	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	98	76	82	63	27	21	90	74	75	61	25	21	
		Herstellkosten [€]	4.345	4.030	5.869	5.529	9.731	9.391	5.195	4.430	6.719	5.929	10.581	9.791	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	37,2	38,1	48,1	49,6	82,6	82,6	42,1	40,1	52,3	51,2	84,0	83,2	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	94	71	77	58	26	20	86	69	71	56	24	19	
		Herstellkosten [€]	3.789	3.550	5.220	4.957	8.845	8.582	5.003	4.314	6.433	5.721	10.059	9.346	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	39,7	42,3	50,9	53,9	83,3	83,8	44,3	44,1	54,6	55,4	84,6	84,3	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	90	66	73	53	25	19	83	64	68	51	23	18	
		Herstellkosten [€]	3.324	3.146	4.478	4.278	7.650	7.450	4.849	4.221	6.003	5.353	9.175	8.525	

Abb. 12-9: Technologiepakete für LNF Gruppe I (II / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real.}		TP1		TP2K		TP2H		TP2PHEV		TP3K		TP3H		TP3PHEV	
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Motor	Direkteinspritzung, homogen	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Direkteinspritzung, Schichtladung	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 1)	5,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 2)	9,0%	5,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 3)	18,0%	8,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HCCI / CAI	11,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	10,0%	1,5%	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	
	Mild-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	
	Plug-in-Hybrid	60,0%	60,0%	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	
Getriebe	Getriebeoptimierung / Dow nspeeding	3,5%	3,0%	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	
	Automatisiertes Schaltgetriebe	3,3%	3,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Stufenloses Getriebe (CVT)	4,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Doppelkupplungsgetriebe	6,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7/8/9-Gang-Automatik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Übergreif. Maßnahmen	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Thermomanagement	2,5%	2,6%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	2,3%	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	2,3%	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Fahrwiderstände	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	2,8%	2,8%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	
	Aerodynamik-Design	2,0%	2,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	1,5%	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			-1,6	-1,5	-7,5	-8,0	-5,1	-5,3	1,0	0,5	-12,8	-13,3	-8,3	-8,8	-4,3	-4,8
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			-24	-22	-110	-118	-75	-79	15	7	-188	-196	-121	-130	-63	-71
	Flottengewicht [kg]			1.441	1.454	1.355	1.358	1.390	1.397	1.480	1.483	1.277	1.280	1.344	1.346	1.402	1.405
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	20,6	15,3	32,5	24,1	35,5	26,5	71,6	67,8	35,6	30,5	45,1	42,2	73,1	70,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	138	120	118	108	112	104	49	46	112	99	96	82	47	42	
		Herstellkosten [€]	1.160	880	2.670	1.980	4.040	3.330	6.940	6.230	3.970	3.410	6.710	6.160	8.240	7.660	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	20,6	15,3	32,5	24,1	35,5	26,5	71,6	67,8	35,6	30,5	45,1	42,2	73,1	70,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	138	120	118	108	112	104	49	46	112	99	96	82	47	42	
		Herstellkosten [€]	1.160	880	2.670	1.980	4.040	3.330	6.940	6.230	3.970	3.410	6.710	6.160	8.240	7.660	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	20,6	15,3	32,5	24,1	35,5	26,5	71,6	67,8	35,6	30,5	45,1	42,2	73,1	70,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	138	120	118	108	112	104	49	46	112	99	96	82	47	42	
		Herstellkosten [€]	1.098	833	2.445	1.824	3.521	2.881	5.805	5.165	3.476	2.988	5.668	5.188	6.836	6.329	
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	20,6	15,3	32,5	24,1	35,5	26,5	71,6	67,8	35,6	30,5	45,1	42,2	73,1	70,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	138	120	118	108	112	104	49	46	112	99	96	82	47	42	
		Herstellkosten [€]	1.160	880	2.670	1.980	3.789	3.079	6.126	5.416	3.970	3.410	6.258	5.708	7.426	6.846	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	22,1	16,6	33,9	25,8	37,3	28,6	72,2	68,5	37,3	32,5	46,7	44,4	73,8	71,4	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	136	118	115	105	109	101	48	45	109	96	93	79	46	41	
		Herstellkosten [€]	1.114	846	2.481	1.855	3.558	2.913	5.777	5.131	3.574	3.073	5.768	5.276	6.870	6.350	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	23,4	17,9	35,4	27,4	39,0	30,8	72,8	69,2	38,9	34,5	48,4	46,4	74,5	72,2	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	133	117	112	103	106	98	47	44	106	93	90	76	44	39	
		Herstellkosten [€]	1.079	820	2.266	1.714	3.065	2.495	4.871	4.302	3.059	2.637	4.735	4.318	5.665	5.224	
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	20,6	15,3	32,5	24,1	35,5	26,5	71,6	67,8	35,6	30,5	45,1	42,2	73,1	70,5	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	138	120	118	108	112	104	49	46	112	99	96	82	47	42	
		Herstellkosten [€]	1.160	880	2.670	1.980	3.656	2.946	5.731	5.021	3.970	3.410	6.019	5.469	7.031	6.451	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	23,4	17,9	35,4	27,4	39,0	30,8	72,8	69,2	38,9	34,5	48,4	46,4	74,5	72,2	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	133	117	112	103	106	98	47	44	106	93	90	76	44	39	
		Herstellkosten [€]	1.114	846	2.421	1.822	3.345	2.728	5.293	4.675	3.384	2.913	5.300	4.837	6.256	5.766	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	26,2	20,3	38,1	30,5	42,2	34,9	74,0	70,5	41,9	38,2	51,4	50,4	75,8	73,8	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	128	113	108	99	101	93	45	42	101	88	85	70	42	37	
		Herstellkosten [€]	1.079	820	2.244	1.709	2.972	2.418	4.685	4.131	2.897	2.497	4.441	4.047	5.338	4.919	

Abb. 12-10: Technologiepakete für LNF Gruppe II (I / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real.}		TP4K		TP4H		TP4PHEV		TP5K		TP5H		TP5PHEV		
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	
Motor	Direkteinspritzung, homogen	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	Direkteinspritzung, Schichtladung	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Dow nsizing (Stufe 1)	5,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Dow nsizing (Stufe 2)	9,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Dow nsizing (Stufe 3)	18,0%	8,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	HCCI / CAI	11,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Variable Verdichtung	7,0%	5,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	3,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ventilsteuerung - vollvariabel	10,0%	1,5%	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	Zylinderabschaltung	6,0%	4,0%	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	Verbrennungssteuerung	-	1,0%	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	-	3,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓		
Hybrid	Micro-Hybrid	7,0%	6,0%	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	
	Mild-Hybrid	14,5%	10,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Full-Hybrid	26,5%	23,5%	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	
	Plug-in-Hybrid	60,0%	60,0%	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	
Getriebe	Getriebeoptimierung / Dow nspeeding	3,5%	3,0%	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	Automatisiertes Schaltgetriebe	3,3%	3,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Stufenloses Getriebe (CVT)	4,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Doppelkupplungsgetriebe	6,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Übergreif. Maßnahmen	7/8/9-Gang-Automatik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	3,5%	3,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Thermomanagement	2,5%	2,6%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	2,3%	2,3%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Fahrwiderstände	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	2,3%	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	2,8%	2,8%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Aerodynamik-Optimierung	2,3%	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Aerodynamik-Design	2,0%	2,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	1,5%	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	5,0%	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - stark (Karosserie)	9,0%	9,0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Leichtbau - Komponenten	1,5%	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Leichtbau - Komponenten - stark	2,5%	2,5%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			-13,0	-13,8	-8,5	-9,3	-4,5	-5,3	-16,8	-17,8	-12,3	-13,3	-8,3	-9,3	
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			-190	-203	-124	-137	-66	-78	-246	-262	-180	-196	-121	-137	
	Flottengewicht [kg]			1.275	1.273	1.341	1.339	1.399	1.398	1.219	1.214	1.285	1.280	1.344	1.339	
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	39,8	35,7	49,7	46,6	74,9	72,7	x	x	x	x	x	x	x	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	105	91	87	76	44	39	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	5.195	4.585	7.513	6.883	8.651	8.021	x	x	x	x	x	x	x	x
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	41,2	37,8	51,2	48,9	75,5	73,6	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	102	88	85	73	43	37	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	4.806	4.253	7.033	6.461	8.101	7.529	x	x	x	x	x	x	x	x
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	42,6	39,9	52,7	51,1	76,1	74,5	x	x	x	x	x	x	x	x
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	100	85	82	69	42	36	x	x	x	x	x	x	x	x
		Herstellkosten [€]	4.295	3.817	6.011	5.514	6.900	6.404	x	x	x	x	x	x	x	x
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	39,8	35,7	49,7	46,6	74,9	72,7	44,7	37,7	54,0	48,3	77,0	73,6		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	105	91	87	76	44	39	96	88	80	73	40	38		
		Herstellkosten [€]	5.195	4.585	7.274	6.644	8.256	7.626	6.070	4.985	8.149	7.044	9.131	8.026		
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	42,6	39,9	52,7	51,1	76,1	74,5	47,1	41,8	56,5	52,6	78,0	75,3		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	100	85	82	69	42	36	92	83	76	67	38	35		
		Herstellkosten [€]	4.614	4.089	6.567	6.024	7.486	6.942	5.852	4.853	7.806	6.787	8.724	7.706		
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	45,2	43,9	55,4	55,2	77,2	76,2	49,3	45,7	58,8	56,6	79,0	77,0		
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	95	80	78	64	40	34	88	77	72	62	37	33		
		Herstellkosten [€]	4.129	3.673	5.716	5.242	6.569	6.095	5.678	4.748	7.266	6.317	8.119	7.170		

Abb. 12-11: Technologiepakete für LNF Gruppe II (II / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real.}		TP1		TP2K		TP2H		TP2PHEV		TP3K		TP3H		TP3PHEV	
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Motor	Direkteinspritzung, homogen	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Direkteinspritzung, Schichtladung	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 1)	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 2)	n.a.	5,0%	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-
	Downsizing (Stufe 3)	n.a.	7,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HCCI / CAI	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Variable Verdichtung	n.a.	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	n.a.	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Zylinderabschaltung	n.a.	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Verbrennungssteuerung	n.a.	1,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	n.a.	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	
Hybrid	Micro-Hybrid	n.a.	6,0%	-	✓	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
	Mid-Hybrid	n.a.	9,5%	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
	Full-Hybrid	n.a.	22,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
	Plug-in-Hybrid	n.a.	60,0%	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	✓
Getriebe	Getriebeoptimierung / Downsizing	n.a.	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Automatisiertes Schaltgetriebe	n.a.	3,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stufenloses Getriebe (CVT)	n.a.	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Doppelkupplungsgetriebe	n.a.	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Übergreif. Maßnahmen	7/8/9-Gang-Automatik	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	n.a.	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓
	Elektrifizierung von Nebenaggregaten	n.a.	3,5%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓
	Thermomanagement	n.a.	2,5%	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓
	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)	n.a.	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fahrwiderstände	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	n.a.	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	n.a.	3,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓
	Aerodynamik-Optimierung	n.a.	2,3%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-
	Aerodynamik-Design	n.a.	2,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	n.a.	1,5%	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	n.a.	5,0%	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - stark (Karosserie)	n.a.	9,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	n.a.	12,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Leichtbau - Komponenten	n.a.	1,5%	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓
	Leichtbau - Komponenten - stark	n.a.	2,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]			n.a.	-1,6	n.a.	-8,0	n.a.	-5,9	n.a.	-0,4	n.a.	-13,2	n.a.	-8,6	n.a.	-5,6
	Abs. Gewichtsänderung [kg]			n.a.	-33	n.a.	-167	n.a.	-122	n.a.	-9	n.a.	-276	n.a.	-181	n.a.	-118
	Flottengewicht [kg]			n.a.	2.056	n.a.	1.922	n.a.	1.967	n.a.	2.080	n.a.	1.813	n.a.	1.908	n.a.	1.971
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	16,2	n.a.	25,1	n.a.	26,6	n.a.	68,2	n.a.	30,7	n.a.	41,7	n.a.	70,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	187	n.a.	167	n.a.	164	n.a.	71	n.a.	155	n.a.	130	n.a.	66	
		Herstellkosten [€]	n.a.	985	n.a.	2.260	n.a.	3.635	n.a.	7.235	n.a.	3.985	n.a.	6.810	n.a.	8.960	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	16,2	n.a.	25,1	n.a.	26,6	n.a.	68,2	n.a.	30,7	n.a.	41,7	n.a.	70,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	187	n.a.	167	n.a.	164	n.a.	71	n.a.	155	n.a.	130	n.a.	66	
		Herstellkosten [€]	n.a.	985	n.a.	2.260	n.a.	3.635	n.a.	7.235	n.a.	3.985	n.a.	6.810	n.a.	8.960	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	16,2	n.a.	25,1	n.a.	26,6	n.a.	68,2	n.a.	30,7	n.a.	41,7	n.a.	70,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	187	n.a.	167	n.a.	164	n.a.	71	n.a.	155	n.a.	130	n.a.	66	
		Herstellkosten [€]	n.a.	933	n.a.	2.080	n.a.	3.155	n.a.	5.997	n.a.	3.478	n.a.	5.743	n.a.	7.395	
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	16,2	n.a.	25,1	n.a.	26,6	n.a.	68,2	n.a.	30,7	n.a.	41,7	n.a.	70,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	187	n.a.	167	n.a.	164	n.a.	71	n.a.	155	n.a.	130	n.a.	66	
		Herstellkosten [€]	n.a.	985	n.a.	2.260	n.a.	3.377	n.a.	6.289	n.a.	3.985	n.a.	6.344	n.a.	8.014	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	17,3	n.a.	26,5	n.a.	28,6	n.a.	68,8	n.a.	32,4	n.a.	43,6	n.a.	71,3	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	184	n.a.	164	n.a.	159	n.a.	70	n.a.	151	n.a.	126	n.a.	64	
		Herstellkosten [€]	n.a.	948	n.a.	2.116	n.a.	3.191	n.a.	5.959	n.a.	3.580	n.a.	5.847	n.a.	7.423	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	18,5	n.a.	27,9	n.a.	30,5	n.a.	69,4	n.a.	34,0	n.a.	45,6	n.a.	72,0	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	182	n.a.	161	n.a.	155	n.a.	68	n.a.	147	n.a.	121	n.a.	62	
		Herstellkosten [€]	n.a.	918	n.a.	1.954	n.a.	2.744	n.a.	4.994	n.a.	3.051	n.a.	4.790	n.a.	6.091	
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	16,2	n.a.	25,1	n.a.	26,6	n.a.	68,2	n.a.	30,7	n.a.	41,7	n.a.	70,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	187	n.a.	167	n.a.	164	n.a.	71	n.a.	155	n.a.	130	n.a.	66	
		Herstellkosten [€]	n.a.	985	n.a.	2.260	n.a.	3.240	n.a.	5.831	n.a.	3.985	n.a.	6.098	n.a.	7.556	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	18,5	n.a.	27,9	n.a.	30,5	n.a.	69,4	n.a.	34,0	n.a.	45,6	n.a.	72,0	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	182	n.a.	161	n.a.	155	n.a.	68	n.a.	147	n.a.	121	n.a.	62	
		Herstellkosten [€]	n.a.	948	n.a.	2.078	n.a.	2.996	n.a.	5.428	n.a.	3.383	n.a.	5.367	n.a.	6.734	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	20,7	n.a.	30,6	n.a.	34,1	n.a.	70,5	n.a.	37,3	n.a.	49,2	n.a.	73,4	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	177	n.a.	155	n.a.	147	n.a.	66	n.a.	140	n.a.	113	n.a.	59	
		Herstellkosten [€]	n.a.	918	n.a.	1.947	n.a.	2.664	n.a.	4.796	n.a.	2.878	n.a.	4.486	n.a.	5.727	

Abb. 12-12: Technologiepakete für LNF Gruppe III (I / II)

Technologien		CO ₂ -Einsparung _{2030-real.}		TP4K		TP4H		TP4PHEV		TP5K		TP5H		TP5PHEV	
		B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Motor	Direkteinspritzung, homogen	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Direkteinspritzung, Schichtladung	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 1)	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 2)	n.a.	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dow nsizing (Stufe 3)	n.a.	7,5%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓
	Gekühlte-/ Hochlast-AGR	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HCCI / CAI	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Variable Verdichtung	n.a.	5,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓
	Ventilsteuerung - variabel (VVT)	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ventilsteuerung - vollvariabel	n.a.	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zylinderabschaltung	n.a.	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Verbrennungssteuerung	n.a.	1,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	
AGR - verbesserte Kühlung und Strömung	n.a.	3,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	
Hybrid	Micro-Hybrid	n.a.	6,0%	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	
	Mid-Hybrid	n.a.	9,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Full-Hybrid	n.a.	22,5%	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	
	Plug-in-Hybrid	n.a.	60,0%	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓	
Getriebe	Getriebeoptimierung / Dow nspeeding	n.a.	3,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Automatisiertes Schaltgetriebe	n.a.	3,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Stufenloses Getriebe (CVT)	n.a.	4,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Doppelkupplungsgetriebe	n.a.	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7/8/9-Gang-Automatik	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Übergeif. Maßnahmen	Reibungsreduzierung Motor, Getriebe und Endantrieb	n.a.	4,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
		Elektrifizierung von Nebenaggregaten	n.a.	3,5%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
		Thermomanagement	n.a.	2,5%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
Wärmeenergie-Rückgewinnung (Rankine-Zyklus)		n.a.	2,3%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
Fahrwiderstände	Wärmeenergie-Rückgewinnung (Thermoelektrischer Generator)	n.a.	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Rollwiderstandsreduzierte Reifen	n.a.	3,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	Aerodynamik-Optimierung	n.a.	2,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Aerodynamik-Design	n.a.	2,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	Leichtbau - leicht (Karosserie)	n.a.	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - mittel (Karosserie)	n.a.	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - stark (Karosserie)	n.a.	9,0%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	Leichtbau - sehr stark (Karosserie)	n.a.	12,0%	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	
	Leichtbau - Komponenten	n.a.	1,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Leichtbau - Komponenten - stark	n.a.	2,5%	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	
Gewichtsangaben	Rel. Gewichtsänderung [%]	n.a.	-14,0	n.a.	-9,4	n.a.	-6,4	n.a.	-18,0	n.a.	-13,4	n.a.	-10,4		
	Abs. Gewichtsänderung [kg]	n.a.	-293	n.a.	-197	n.a.	-135	n.a.	-376	n.a.	-281	n.a.	-218		
	Flottengewicht [kg]	n.a.	1.796	n.a.	1.892	n.a.	1.954	n.a.	1.713	n.a.	1.808	n.a.	1.871		
2020	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		Herstellkosten [€]	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
2025	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	35,8	n.a.	46,1	n.a.	72,8	x	x	x	x	x	x	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	143	n.a.	120	n.a.	61	x	x	x	x	x	x	
		Herstellkosten [€]	n.a.	5.335	n.a.	7.694	n.a.	9.364	x	x	x	x	x	x	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	37,8	n.a.	48,2	n.a.	73,6	x	x	x	x	x	x	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	139	n.a.	115	n.a.	59	x	x	x	x	x	x	
		Herstellkosten [€]	n.a.	4.942	n.a.	7.209	n.a.	8.784	x	x	x	x	x	x	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	39,7	n.a.	50,3	n.a.	74,4	x	x	x	x	x	x	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	134	n.a.	111	n.a.	57	x	x	x	x	x	x	
		Herstellkosten [€]	n.a.	4.424	n.a.	6.164	n.a.	7.465	x	x	x	x	x	x	
2030	Konservativ	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	35,8	n.a.	46,1	n.a.	72,8	n.a.	37,9	n.a.	47,8	n.a.	73,6	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	143	n.a.	120	n.a.	61	n.a.	139	n.a.	116	n.a.	59	
		Herstellkosten [€]	n.a.	5.335	n.a.	7.448	n.a.	8.906	n.a.	5.635	n.a.	7.748	n.a.	9.206	
	Trend	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	39,7	n.a.	50,3	n.a.	74,4	n.a.	41,6	n.a.	51,8	n.a.	75,2	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	134	n.a.	111	n.a.	57	n.a.	130	n.a.	107	n.a.	55	
		Herstellkosten [€]	n.a.	4.747	n.a.	6.731	n.a.	8.097	n.a.	5.487	n.a.	7.471	n.a.	8.838	
	Progressiv	CO ₂ -Einsparung [%]	n.a.	43,4	n.a.	54,2	n.a.	76,0	n.a.	45,1	n.a.	55,6	n.a.	76,7	
		CO ₂ -Ausstoß [g/km]	n.a.	126	n.a.	102	n.a.	54	n.a.	122	n.a.	99	n.a.	52	
		Herstellkosten [€]	n.a.	4.252	n.a.	5.860	n.a.	7.101	n.a.	5.369	n.a.	6.977	n.a.	8.218	

Abb. 12-13: Technologiepakete für LNF Gruppe III (II / II)

12.3 Kostenkurven der Technologiepakete

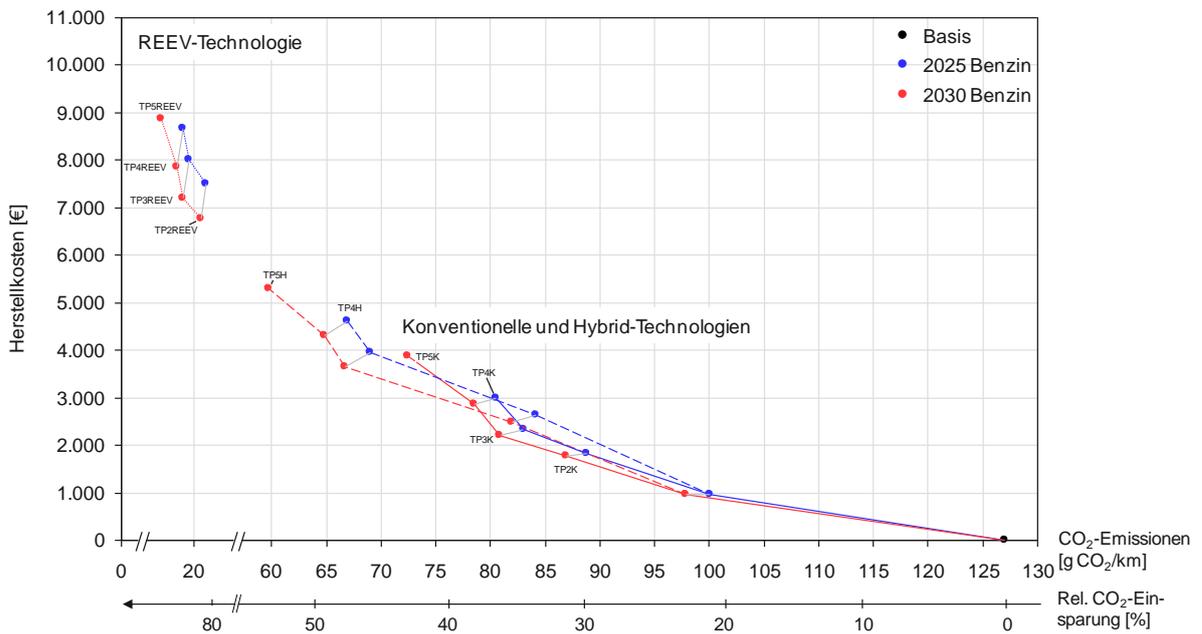


Abb. 12-14: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für Pkw SEG-1 Benziner im Trendszenario

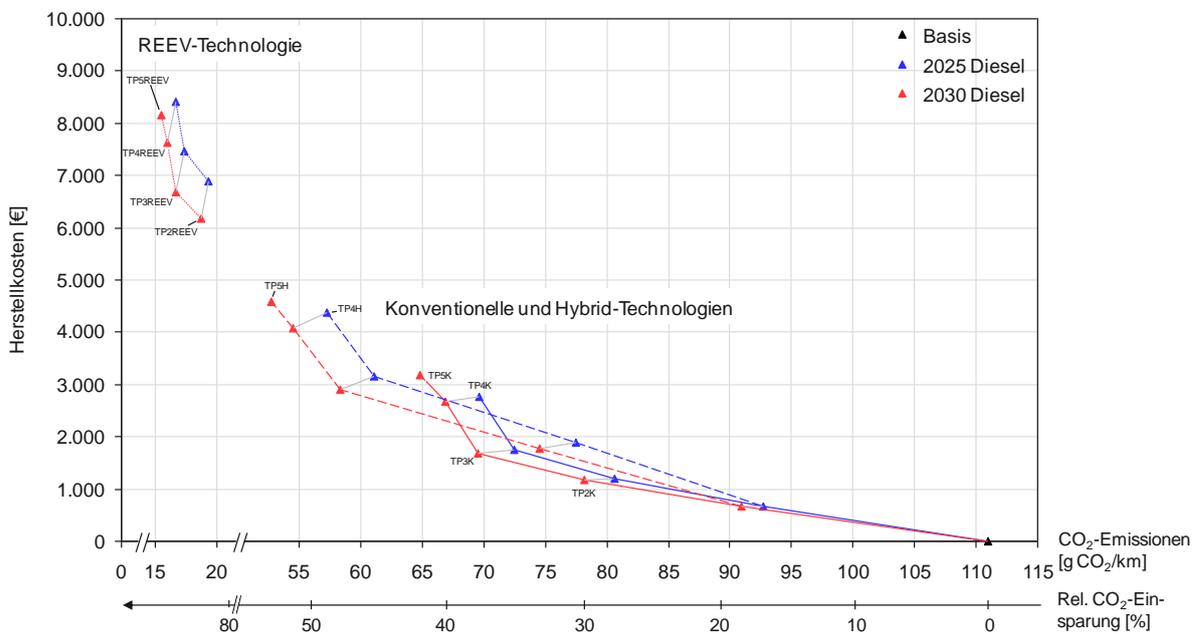


Abb. 12-15: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für Pkw SEG-1 Diesel im Trendszenario

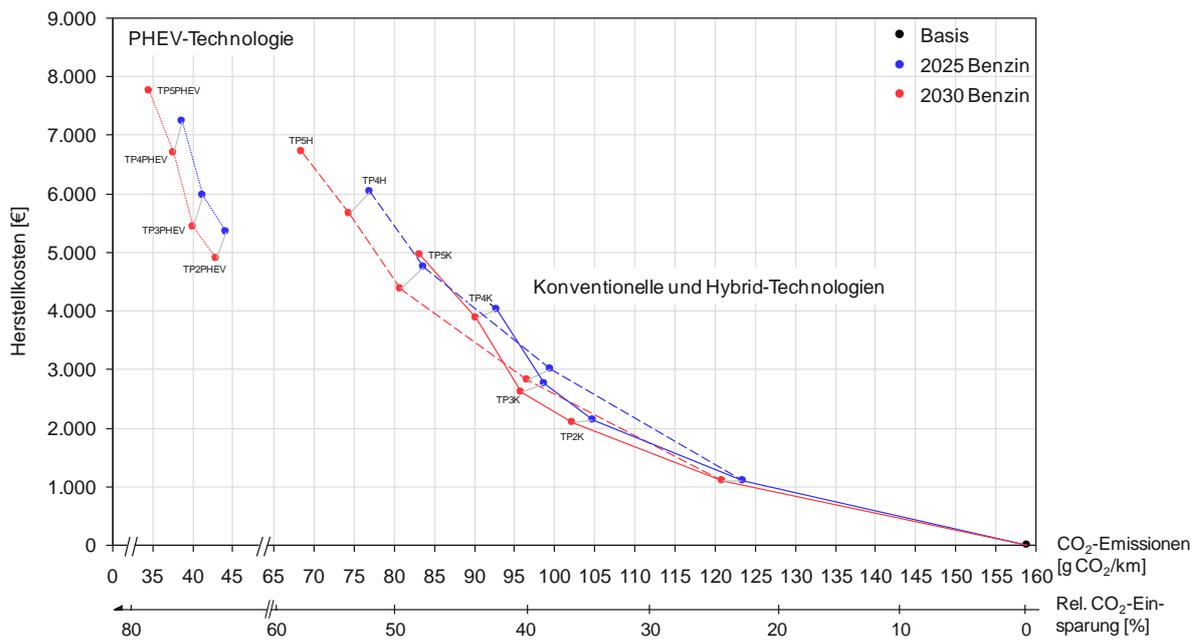


Abb. 12-16: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für Pkw SEG-2 Benziner im Trendszenario

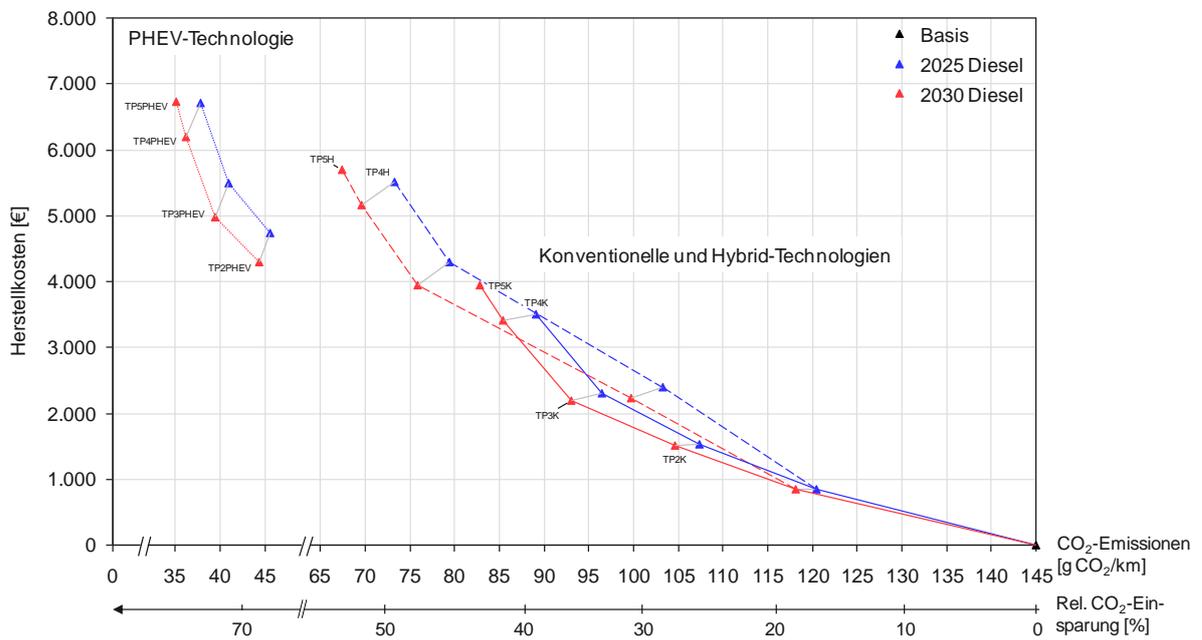


Abb. 12-17: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für Pkw SEG-2 Diesel im Trendszenario

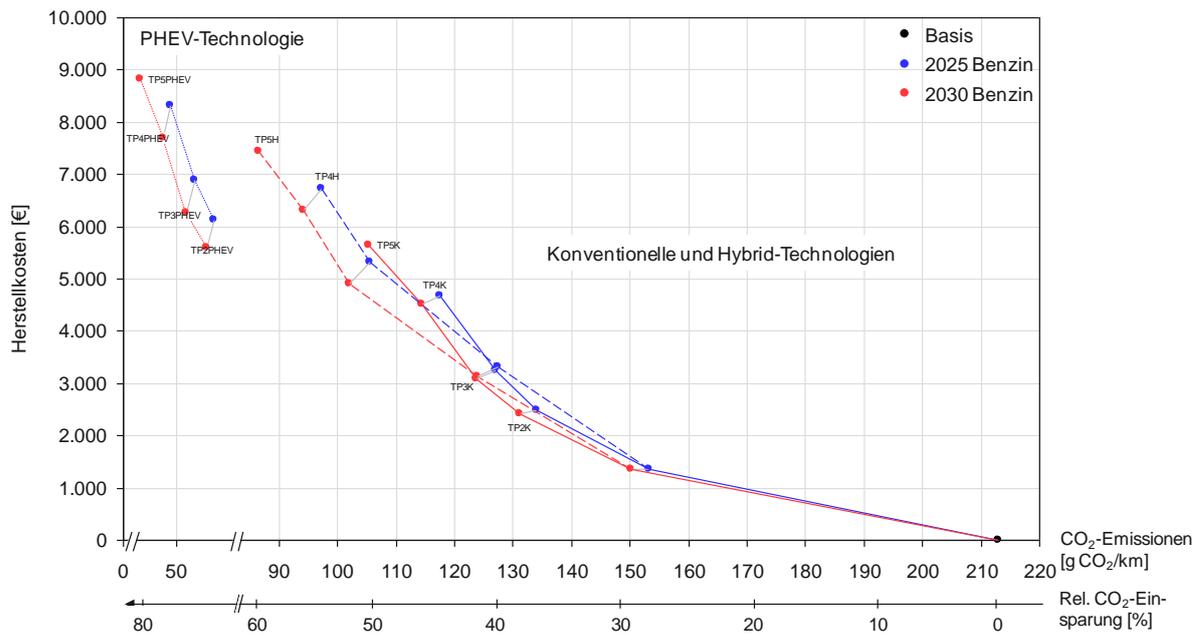


Abb. 12-18: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für Pkw SEG-3 Benziner im Trendszenario

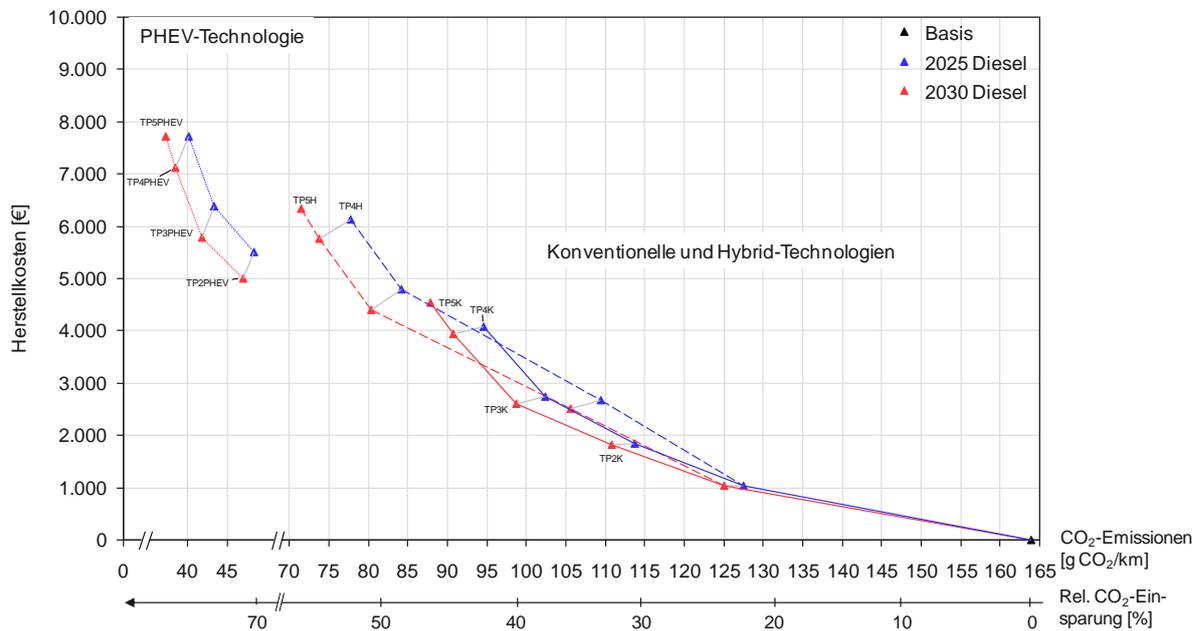


Abb. 12-19: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für Pkw SEG-3 Diesel im Trendszenario

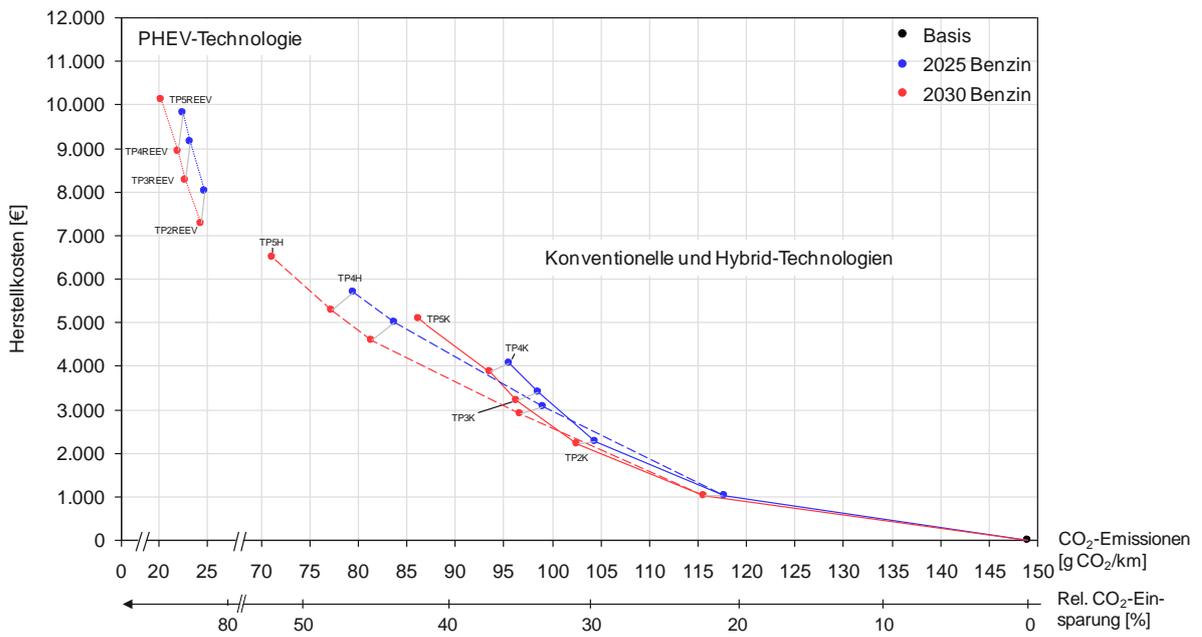


Abb. 12-20: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für LNF Gruppe I Benziner im Trendszenario

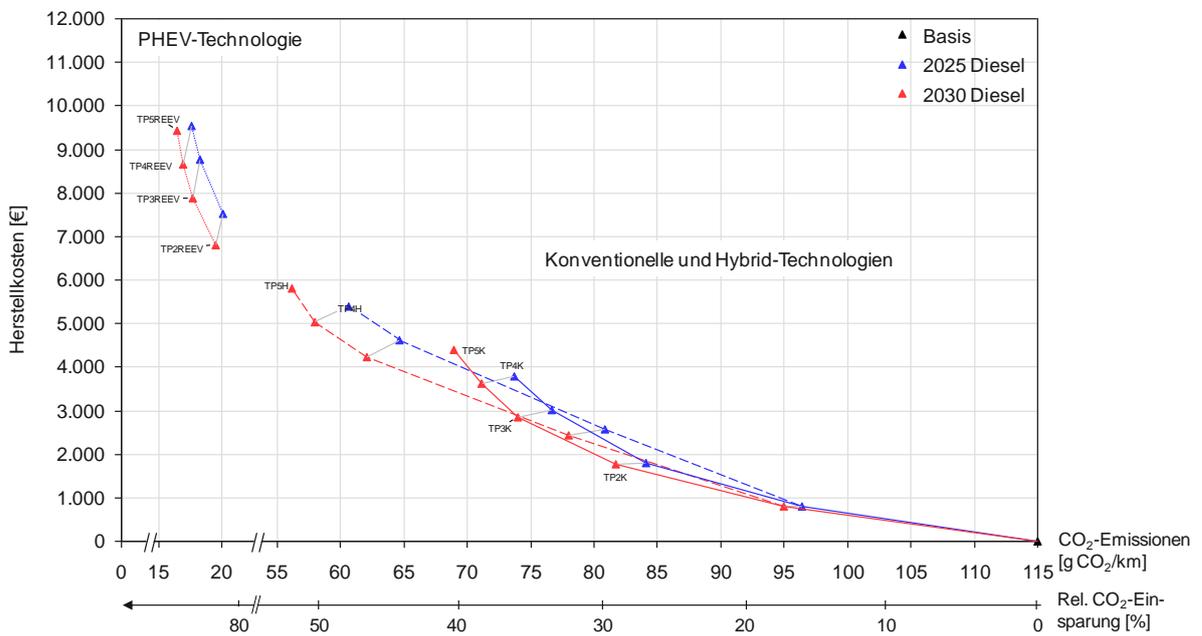


Abb. 12-21: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für LNF Gruppe I Diesel im Trendszenario

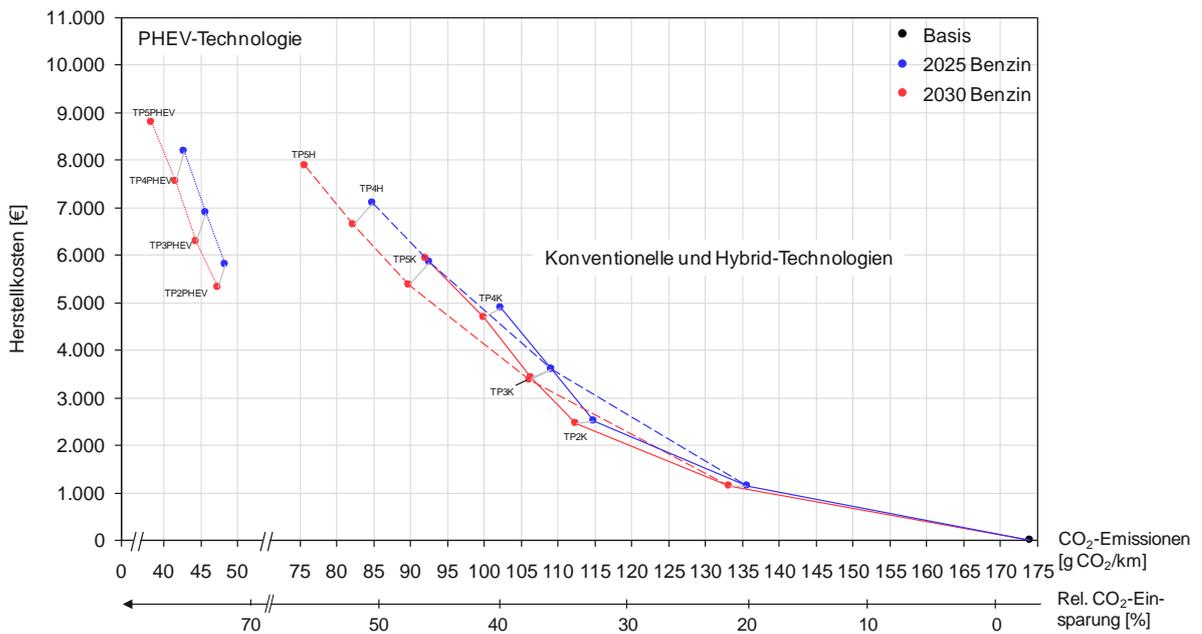


Abb. 12-22: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für LNF Gruppe II Benziner im Trendszenario

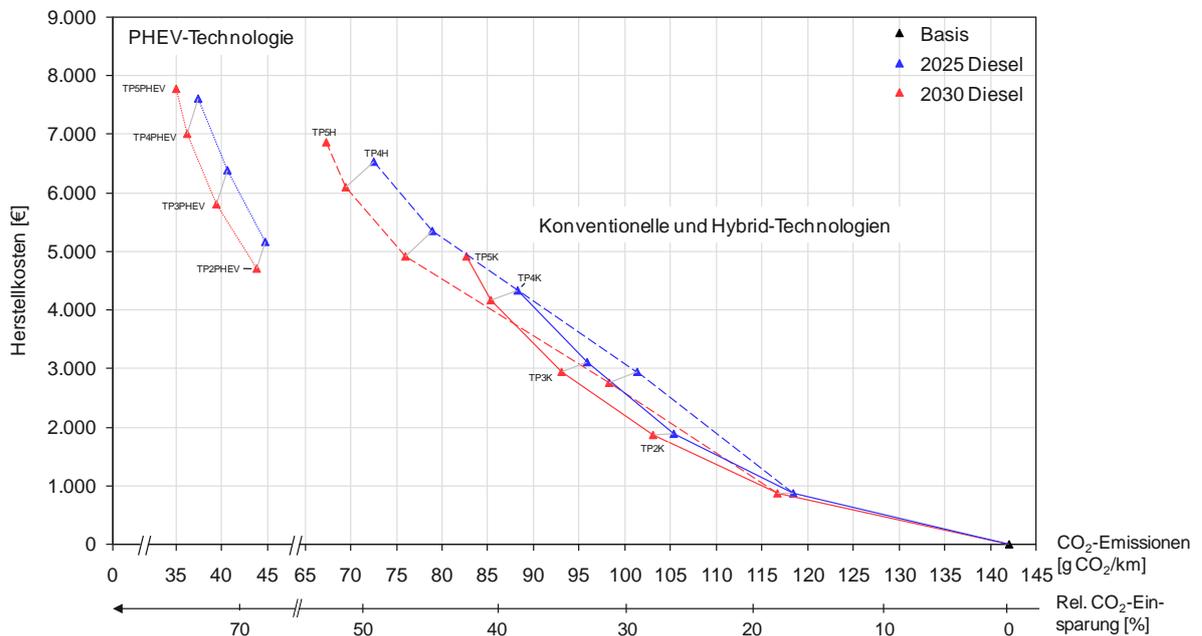


Abb. 12-23: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für LNF Gruppe II Diesel im Trendszenario

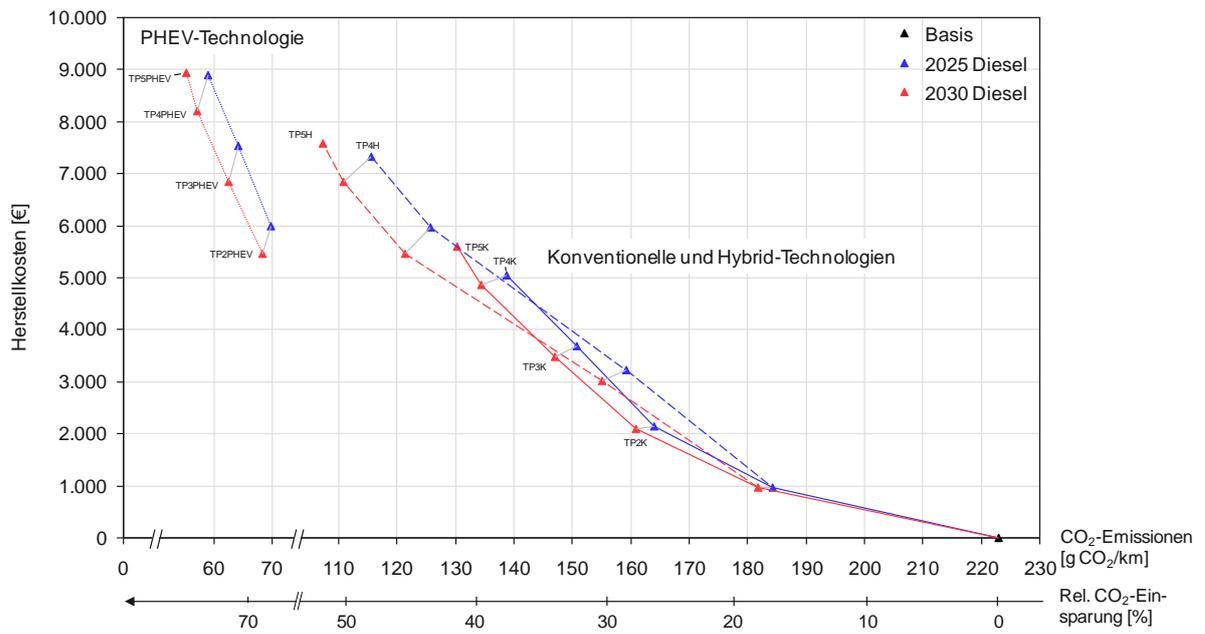


Abb. 12-24: Herstellkosten über absoluter und relativer CO₂-Minderung für LNF Gruppe III Diesel im Trendszenario

12.4 Szenariendefinition

			2025			2030		
		[Einheit]	Kons.	Trend	Prog.	Kons.	Trend	Prog.
Energiepreise	Benzin	[€/ l]	2,12	3,09	3,90	2,41	3,80	5,09
	Diesel	[€/ l]	2,06	3,01	3,44	2,35	3,77	4,49
	Strom	[€/ kWh]	0,27	0,33	0,46	0,31	0,47	0,61
Segment- entwicklung	Pkw SEG-1	[%] aller Pkw	39	47	47	39	55	55
	Pkw SEG-2	[%] aller Pkw	57	49	49	57	42	42
	Pkw SEG-3	[%] aller Pkw	4	4	4	4	3	3
	LNF Gr. I	[%] aller LNF	11	11	11	11	11	11
	LNF Gr. II	[%] aller LNF	31	31	31	31	31	31
	LNF Gr. III	[%] aller LNF	58	58	58	58	58	58
Kraftstoffarten	Benzin	[%] v. Pkw SEG-1	67	60	58	67	58	56
	Diesel	[%] v. Pkw SEG-1	28	31	30	28	30	28
	Gas	[%] v. Pkw SEG-1	5	7	8	5	8	10
	Elektro	[%] v. Pkw SEG-1	0	2	4	0	4	6
	Benzin	[%] v. Pkw SEG-2	32	28	26	32	27	25
	Diesel	[%] v. Pkw SEG-2	66	67	65	66	67	63
	Gas	[%] v. Pkw SEG-2	2	4	6	2	4	8
	Elektro	[%] v. Pkw SEG-2	0	1	3	0	2	4
	Benzin	[%] v. Pkw SEG-3	25	31	30	25	30	28
	Diesel	[%] v. Pkw SEG-3	75	66	65	75	65	63
	Gas	[%] v. Pkw SEG-3	0	2	4	0	4	8
	Elektro	[%] v. Pkw SEG-3	0	1	1	0	1	1
	Benzin	[%] v. LNF Gr. I	12	10	9	12	9	7
	Diesel	[%] v. LNF Gr. I	87	81	79	87	80	77
	Gas	[%] v. LNF Gr. I	1	7	8	1	8	10
	Elektro	[%] v. LNF Gr. I	0	2	4	0	3	6
	Benzin	[%] v. LNF Gr. II	2	2	1	2	2	1
	Diesel	[%] v. LNF Gr. II	97	95	91	97	94	87
	Gas	[%] v. LNF Gr. II	1	1	4	1	1	6
	Elektro	[%] v. LNF Gr. II	0	2	4	0	3	6
	Benzin	[%] v. LNF Gr. III	0	0	0	0	0	0
	Diesel	[%] v. LNF Gr. III	100	98	97	100	96	95
	Gas	[%] v. LNF Gr. III	0	0	0	0	0	0
	Elektro	[%] v. LNF Gr. III	0	2	3	0	4	5

Abb. 12-25: Quantitative Annahmen im Rahmen der Szenariendefinition

			Pkw			LNF		
		[Einheit]	SEG-1	SEG-2	SEG-3	Gr. I	Gr. II	Gr. III
Fahrzeughalter	privat	[%]	50	50	80	0	0	0
	gewerblich	[%]	50	50	20	100	100	100
Fahrleistungen	Benzin –privat	[Tsd. km / a]	12	14	14	-	-	-
	Benzin . gew.	[Tsd. km / a]	15	21	18	11	11	-
	Diesel –privat	[Tsd. km / a]	15	16	18	-	-	-
	Diesel –gew.	[Tsd. km / a]	26	27	30	16	16	18
Investitionskalkül (Methodik)			statische Amortisationsrechnung					
Betrachtungsdauer	privat	[a]	4	4	4	4	4	4
	gewerblich	[a]	4	4	4	4	4	4
Investitionskalkül (Mehrpreisbereitschaft MPB)	20 % MPB	[% der privaten Kunden]	3			-		
	14 % MPB		14					
	6 % MPB		34					
	2 % MPB		34					
	0 % MPB		15					
	0 % MPB	[% der gewerb. Kunden]	100			100		

Abb. 12-26: Annahmen zu Modellierung der Fahrzeugendkunden

13 Anhang II: Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Testing Procedure

Im November 2007 beauftragte das „World Forum for Harmonization of Vehicle Regulation“ (WP 29) der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), unter der Führung der „Working Party on Pollution and Energy“ (GRPE), die Entwicklung einer „Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure“ (WLTP).

Seit 2009 arbeiten Experten Europas, Japans, Koreas, Indiens und der USA unter dem Dach der Vereinten Nationen an einer „Global Technical Regulation“ (GTR) für ein weltweit einheitliches Verfahren zur verbesserten Abbildung realistischer Kraftstoffverbrauchs- und Emissionswerte von Kraftfahrzeugen. Die „WLTP Sub-group on the Development of the Harmonized Driving Cycle“ (DHC) ist verantwortlich für alle Entwicklungsarbeiten bezüglich des Testzyklus (WLTC), während die „WLTP Sub-group on the Development of the Test Procedure“ (DTP) die Rahmenbedingungen der Testprozedur (WLTP) festlegt. Die Entwicklungsarbeiten der DTP werden dabei von Expertengruppen, z.B. für spezielle Prozeduren für Hybrid-Fahrzeuge, temporär begleitet.

Nach Fertigstellung der GTR soll die WLTP-Prüfprozedur auf europäischer Ebene in die Gesetzgebung implementiert werden, was insbesondere eine Anpassung der Richtlinien zur Typgenehmigung und der CO₂-Flottenziele nach sich zieht. Momentan basieren diese Vorschriften auf dem NEFZ, der dann ab 2017 von der WLTP-Prüfprozedur in Europa abgelöst werden soll. Voraussichtlich wird es im WLTP zu einer Erhöhung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen im Zyklus kommen. Zur Vermeidung einer impliziten Verschärfung der CO₂-Zielwertvorgaben wird derzeit eine Lösung diskutiert, die einen Korrelationszusammenhang zwischen NEFZ und WLTP bestimmt. Die EU-Kommission teilte mit, dass es durch die Einführung eines neuen Verbrauchsmessverfahrens nicht zu einer indirekten Zielverschärfung kommen soll [AUT13].

Die nachfolgende Darstellung des Zyklus sowie der Messprozedur beruht auf dem Diskussionsstand in den jeweiligen WLTP-Arbeitsgruppen sowie insbesondere auf den im November 2013 von der „Working Party on Pollution and Energy“ bestätigten und im März 2014 von der UNECE angenommenen Entwurf der künftigen „Global Technical Regulation“ (GTR) [UNE13]. Einige Aspekte der WLTP-Prüfprozedur werden jedoch erst im Rahmen zukünftiger Ergänzungen der GTR präzisiert. Auf diese Aspekte wird an den relevanten Stellen dieses Kapitels eingegangen.

13.1 Testzyklus (WLTC)

Zur Entwicklung des Testzyklus werden statistische Daten zum Fahrverhalten in den beteiligten Regionen erfasst und ausgewertet. Die regionalen Daten werden entsprechend dem regionalen Anteil an der weltweiten Fahrleistung gewichtet. Anschließend erfolgt eine Aufteilung der Datensätze in Kurztrips (zurückgelegte Strecke zwischen zwei Fahrzeugstillständen) und Stillstandphasen. Kurztrips sind dabei entsprechend der erreichten Höchstgeschwindigkeit in die Segmente Low, Middle, High und Extra-High unterteilt. Nach dem Zufallsprinzip ergibt sich aus der Vielzahl verschiedener Kurztrips in den verschiedenen Seg-

menten und der Stillstandphasen eine große Anzahl potenzieller Fahrzyklen. Durch einen Vergleich dieser mit den dynamischen Eigenschaften der ursprünglichen Datensätze wird ein repräsentativer Testzyklus abgeleitet, welcher entsprechend der realen Testbedingungen, z.B. Fahrbarkeit, finalisiert wird.

Der Testzyklus, der von einem Fahrzeug gemäß WLTP durchfahren werden muss, hängt von dessen fahrzeugspezifischem Verhältnis von Nennleistung zu Leergewicht gemäß Gl. 13-1.

$$\text{Power to mass ratio (PMR)} = \left(\frac{\text{Nennleistung}}{\text{Leergewicht}} \right) \quad \text{Gl. 13-1}$$

Das Leergewicht des Fahrzeugs ist dabei als Masse des Fahrzeugs in fahrbereitem Zustand ohne Fahrer, Beifahrer und Gepäck inklusive einem zu 90 % gefülltem Kraftstofftank, Standardwerkzeug und, sofern vorhanden, Reserverad definiert. Anhand der PMR werden die Fahrzeuge in drei verschiedene Fahrzeugklassen eingeordnet. Die Fahrzeuge der ersten Klasse (Class 1) haben ein PMR kleiner gleich 22 W/kg. Die Fahrzeuge der zweiten Klasse (Class 2) haben ein PMR größer als 22 W/kg, aber kleiner gleich 34 W/kg. Die dritte Klasse (Class 3) umfasst Fahrzeuge mit einem PMR größer als 34 W/kg. Hybrid-Fahrzeuge (HEV und PHEV) und rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge (BEV) werden immer der Klasse 3 zugeordnet. Gemäß der PMR-Klasse existieren verschiedene Zyklen, vgl. Abb. 13-1.

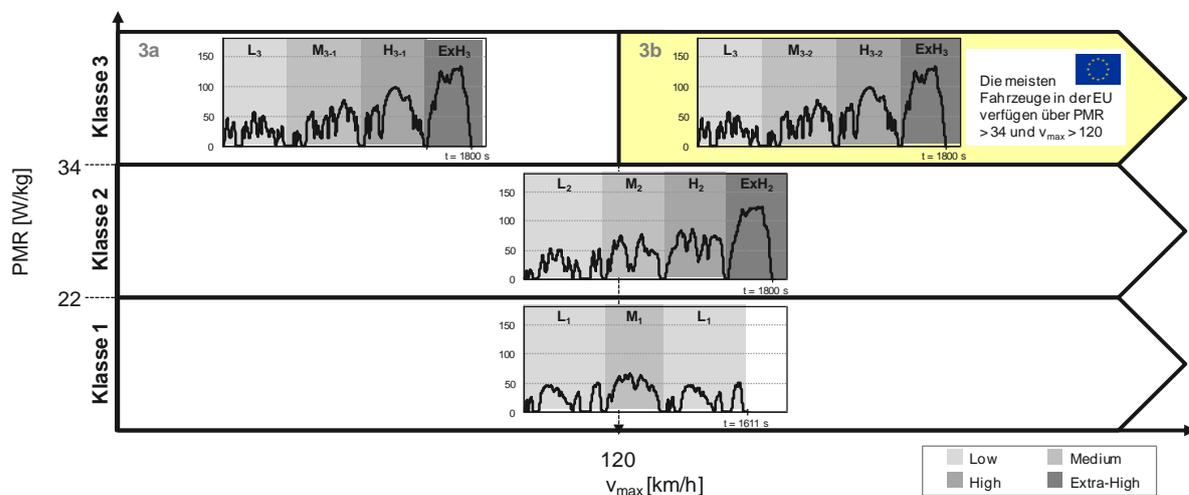


Abb. 13-1: Fahrzyklen der WLTP-Prüfprozedur gemäß PMR und v_{max} [UNE13]

Die PMR-Klasse 3 weist zudem zwei Unterklassen (3a und 3b) auf, die entsprechend einer Höchstgeschwindigkeit kleiner als 120 km/h bzw. größer gleich 120 km/h durchfahren werden müssen. Die klassenspezifischen Zyklen bestehen grundsätzlich aus maximal vier verschiedenen Phasen. Die vier Phasen sind gekennzeichnet als Low, Medium, High und Extra High. Das Geschwindigkeit-Zeit-Profil der einzelnen Phasen ist klassenspezifisch definiert. Fahrzeuge der Klasse 1 durchlaufen z.B. einen Testzyklus mit zwei Low_1 -Phasen und einer dazwischenliegenden $Medium_1$ -Phase. Abb. 13-2 zeigt die klassenspezifische und geschwin-

digkeitsspezifische Aufteilung der Fahrzyklen sowie deren Phasen mit zugehörigem Geschwindigkeit-Zeit-Profil.

In Europa verfügen die meisten Fahrzeuge über ein PMR größer als 34 W/kg und eine Höchstgeschwindigkeit, die mehr als 120 km/h beträgt. Fahrzeuge mit diesen Eigenschaften durchlaufen den WLTC der Klasse 3b, bestehend aus den Phasen Low, Middle, High und Extra-High, vgl. Abb. 13-2.

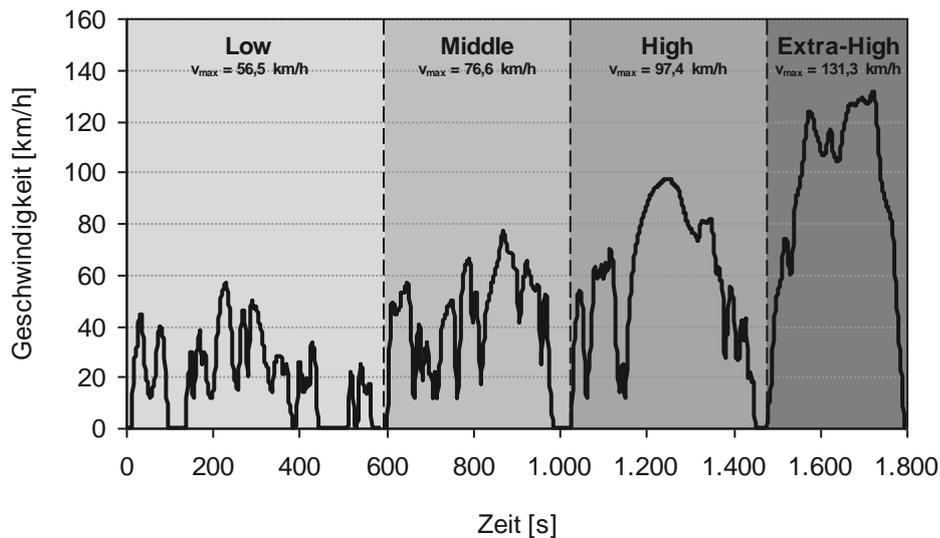


Abb. 13-2: Geschwindigkeit-Zeit-Profil WLTC Klasse 3b [UNE13]

Grundsätzlich bildet der WLTC ein dynamisches Fahrprofil ab, bei dem die Phasen der Beschleunigung, Verzögerung und Stillstand abgebildet werden. Längere Phasen der Konstantfahrt, wie sie vor allem im NEFZ zu finden sind, kommen nur in geringem Maße mit einer Dauer von wenigen Sekunden vor. Die Gesamtdauer des WLTC Klasse 3b ($v_{max} > 120$ km/h) beträgt 1.800 Sekunden, was einer gefahrenen Strecke von 23,27 km entspricht. In der Extra-High₃ Phase wird die Zyklus Höchstgeschwindigkeit von 131,3 km/h erreicht. Die Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei 46,5 km/h. Im WLTC der Klasse 3b werden eine maximale Beschleunigung von $1,7 \text{ m/s}^2$ und eine maximale Verzögerung von $-1,5 \text{ m/s}^2$ in der High₃₋₂ Phase erreicht. Für Fahrzeuge, die dem vorgeschriebenen Geschwindigkeit-Zeit-Profil in ihrer jeweiligen Fahrzeugklasse nicht im Toleranzbereich von ± 2 km/h bzw. ± 1 s folgen können, existiert eine Downscaling-Vorschrift zur Anpassung des Profils für die Abschnitte mit eingeschränkter Fahrbarkeit.

Im Vergleich zum NEFZ verfügt der WLTC über ein dynamischeres Fahrprofil, eine längere Gesamtdauer und gefahrene Strecke, bei einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit. Zudem wird eine größere Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung erreicht. Abb. 13-3 vergleicht zusammenfassend wesentliche Charakteristika des WLTC mit dem NEFZ.

	NEFZ		WLTC Klasse 3b	
Phasen (Zeitanteile)	▪ Beschleunigung	21 %	▪ Beschleunigung	44 %
	▪ Verzögerung	12 %	▪ Verzögerung	40 %
	▪ Stillstand	27 %	▪ Stillstand	12 %
	▪ Konstantfahrt	40 %	▪ Konstantfahrt	4 %
Dauer	20 min.		30 min.	
Strecke	ca. 11 km		ca. 23 km	
Ø – Geschwindigkeit	33,6 km/h		46,5 km/h	
v_{\max}	120 km/h		131 km/h	
a_{\max}	1,04 m/s ²		1,67 m/s ²	
a_{\min}	-1,39 m/s ²		-1,47 m/s ²	

Abb. 13-3: Vergleich der Charakteristika des NEFZ und WLTC

13.2 Testprozedur (WLTP)

Die wichtigsten Bestimmungen, welche die Fahrzeugkonfiguration für den WLTC betreffen, umfassen insbesondere Regelungen zur Prüfmasse, Aerodynamik, Rollwiderstand, Getriebe-Schaltstrategie und Kalkulation von PHEV. Im Folgenden werden die wichtigsten Bestimmungen der WLTP-Prüfprozedur vorgestellt und sich ergebende Änderungen gegenüber der Testprozedur für den NEFZ näher erläutert.

13.2.1 Prüfmasse einer CO₂-Fahrzeugfamilie (CO₂-Interpolationsmethode)

Die Bestimmung der CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs erfolgt durch die Messung am Fahrleistungsprüfstand. Zur Komplexitätsreduktion der Messung jeder vorhandenen Fahrzeugvariante eines Fahrzeugmodells werden sogenannte CO₂-Fahrzeugfamilien anhand identischer Fahrzeugparameter definiert. Die Parameter umfassen gemäß GTR relevante Motoreigenschaften (z.B. Kraftstofftyp, Hubraum, Aufladung), Betriebsstrategie CO₂-relevanter Komponenten des Antriebstrangs (z.B. Dieselpartikelfilter), Getriebeart (z.B.: Getriebespreizung), Drehzahl-Geschwindigkeitsverhältnisse sowie Anzahl angetriebener Achsen. Kriterien für die Definition von Fahrzeugfamilien bei Elektrofahrzeugen sollen noch festgelegt werden.

Aus der CO₂-Fahrzeugfamilie wird vom Fahrzeughersteller und den autorisierten Vertretern der Prüforganisation ein repräsentatives Prüffahrzeug mit fahrwiderstandsrelevanten Eigenschaften (z.B. Fahrzeugmasse) ausgewählt. Der Fahrzeughersteller kann die CO₂-Emissionen einerseits übergreifend für alle Fahrzeugvarianten der CO₂-Fahrzeugfamilie auf Basis eines worst-case Fahrzeugs (H-Fahrzeug) mit fahrwiderstandsrelevanten Eigenschaften, die zum höchsten Fahrwiderstand führen, bestimmen. Andererseits besteht die Möglichkeit zur Anwendung der CO₂-Interpolationsmethode. In diesem Fall wird zusätzlich ein best-case Prüffahrzeug (L-Fahrzeug) bestimmt, das über fahrwiderstandsrelevante Eigenschaften ver-

fügt, die zum geringsten Fahrwiderstand führen. Jedes Prüffahrzeug wird dabei mit den in der Serienproduktion verfügbaren Komponenten ausgestattet. Ausstattungsspezifische Komponenten, die zu einer Veränderung des Produktwertes aus Luftwiderstandsbeiwert c_w und frontaler Fahrzeugquerschnittsfläche A zwischen H-Fahrzeug und L-Fahrzeug führen, müssen dokumentiert werden.

Sowohl für das H- als auch für das L-Fahrzeug ist die zugehörige Prüfmasse in der GTR genau vorgeschrieben. Während das L-Fahrzeug die innerhalb der CO₂-Fahrzeugfamilie angebotene Basisausstattung berücksichtigt, fließt beim L-Fahrzeug zusätzlich die Masse der optional erhältlichen Sonderausstattung in die Prüfmasse mit ein. Abb. 13-4 zeigt die Zusammensetzung der Prüfmasse für L- und H-Fahrzeug.

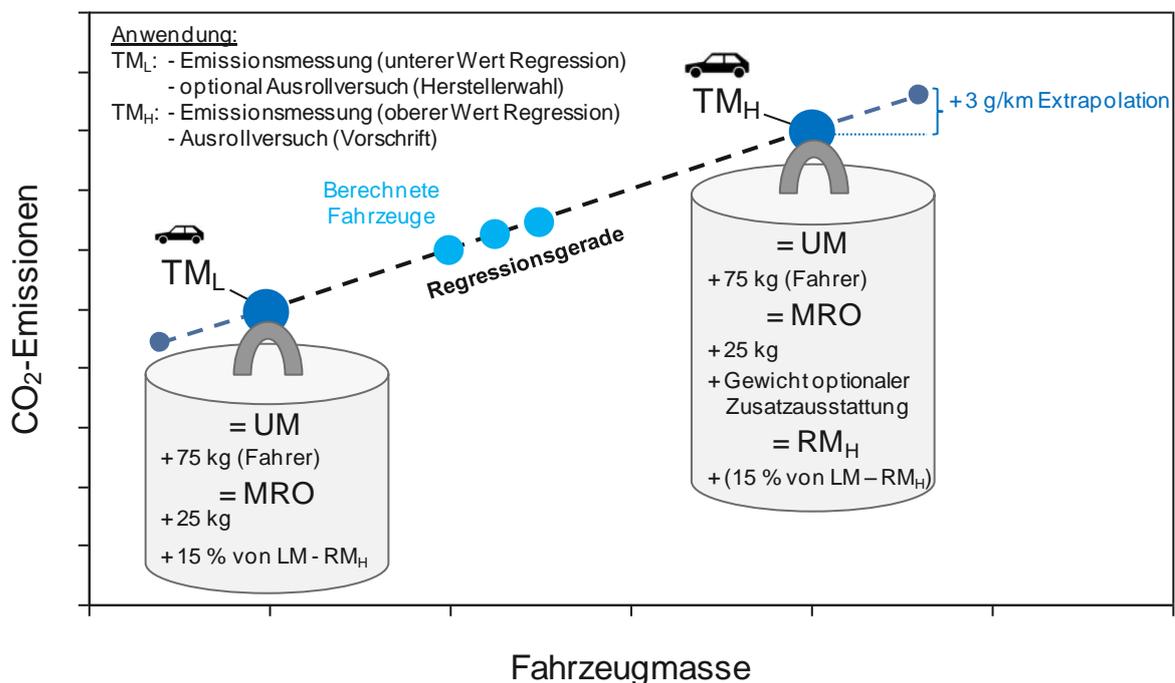


Abb. 13-4: Schematische Darstellung der Prüfmasse und Festlegung der CO₂-Regressionsgeraden [UNE13]

Die maximale Prüfmasse des H-Fahrzeugs (TM_H) ergibt sich aus der Fahrzeugmasse im fahrbereiten Zustand (MRO), der Masse der optionalen Sonderausstattung, 25 kg, und einer variablen Masse zur Berücksichtigung der Beladungskapazität. Die Fahrzeugmasse im fahrbereiten Zustand umfasst die Masse des unbeladenen Fahrzeugs mit Aufbau, Kupplungseinrichtung und Basisausstattung, ein durchschnittliches Fahrgewicht i.H.v. 75 kg, einen zu 90 % gefüllten Kraftstofftank, sowie die vollständige Masse der sonstigen Betriebsflüssigkeiten, des Werkzeugs und sofern vorhanden des Reserverads. Die variable Masse ergibt sich als 15 % der Differenz zwischen der maximal zulässigen Gesamtmasse (LM) und der Referenzmasse des schwersten Fahrzeugs der CO₂-Fahrzeugfamilie (RM_H), definiert als Summe aus Fahrzeugmasse im fahrbereiten Zustand, 25 kg und der Masse der optionalen Zusatzausstattung für das H-Fahrzeug.

Die minimale Prüfmasse des L-Fahrzeugs (TM_L) umfasst die Fahrzeugmasse in fahrbereitem Zustand, 25 kg, und die variable Masse (15 % der Differenz von LM und RM_H). Für Fahrzeuge, welche für den Gütertransport vorgesehen sind, z.B. die EU-Fahrzeugklasse N1 beträgt die variable Masse 28 %.

Basierend auf TM_H und TM_L kann für jede CO_2 -Fahrzeugfamilie eine lineare Regressionsgerade (CO_2 -Emissionen über Fahrzeuggewicht) ermittelt werden. Anhand der CO_2 -Regressionsgeraden können die fahrzeugspezifischen CO_2 -Emissionen der übrigen Fahrzeugvarianten mit unterschiedlichem Ausstattungsniveau vom Hersteller kalkuliert werden. Die CO_2 -Interpolationsmethode soll nur Anwendung finden, wenn die CO_2 -Differenz zwischen L- und H-Prüffahrzeug zwischen einem Minimum von 5 g CO_2/km und einem Maximum von 30 g CO_2/km oder 20 % der CO_2 -Emissionen des H-Prüffahrzeugs liegt. Auf Anfrage des Fahrzeugherstellers und mit Genehmigung der autorisierten Behörde darf die Regressionsgerade um maximal 3 g CO_2/km über die CO_2 -Emissionen des H-Prüffahrzeugs bzw. unterhalb der CO_2 -Emissionen des L-Prüffahrzeugs extrapoliert werden, um zukünftige Fahrzeugvarianten bei der Typgenehmigung zu berücksichtigen. Bezüglich der Fahrzeugmasse ist die WLTP-Prüfprozedur somit sehr eng definiert, so dass geringe Möglichkeiten für Fahrzeughersteller bestehen, unter Ausnutzung von Definitionslücken Vorteile zu erzielen.

13.2.2 Ermittlung der Fahrwiderstände und Einstellung der Schwungmasse

Die Fahrwiderstände eines repräsentativen Fahrzeugs müssen ermittelt werden, um den Fahrleistungsprüfstand bei der Emissionsmessung äquivalent einzustellen. Die im Rahmen der GTR zulässigen Verfahren zur Messung der Fahrwiderstände sind in Abb. 13-5 dargestellt.

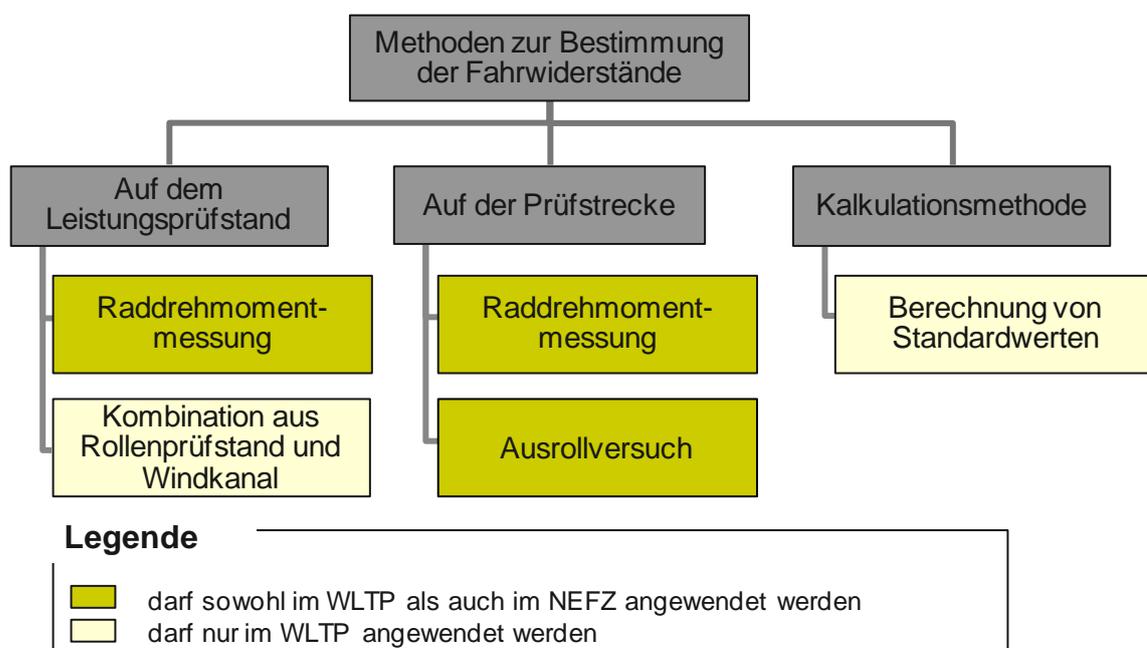


Abb. 13-5: Zulässige Methoden zur Bestimmung der Fahrwiderstände im WLTP und NEFZ [UNE13]

Neben der Raddrehmomentmessung auf der Straße oder am Leistungsprüfstand und dem Ausrollversuch können gegenüber den im NEFZ zulässigen Verfahren auch die Windkanalmessung und Kalkulationsmethode herangezogen werden. Bei der Kalkulationsmethode wird in Abhängigkeit der Prüfmasse, der Fahrzeugbreite und –höhe der Fahrwiderstand für bestimmte Geschwindigkeiten gemäß Gl. 13-2 berechnet.

$$F_c = (0,14 \cdot (1 + 0,00002 \cdot v^2) \cdot TM) + (0,017 \cdot \text{Breite} \cdot \text{Höhe} \cdot v^2) \quad \text{Gl. 13-2}$$

Mit F_c : Berechnete Fahrwiderstandskraft [N] für eine gegebene Geschwindigkeit v
 v : Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]
 TM : Prüfmasse [kg]
 Breite: Fahrzeugbreite [m] gemäß ISO 612:1978
 Höhe: Fahrzeughöhe [m] gemäß ISO 612:1978

Im Rahmen der WLTP-Prüfprozedur wird die Einstellung der Schwungmasse des Fahrleistungsprüfstands entsprechend der Prüfmasse des Fahrzeugs bei Messung der Fahrwiderstände vorgenommen, sofern ein Zwei-Rollenprüfstand verwendet wird. Kann der Rollenprüfstand nicht exakt auf die vorgeschriebene Schwungmasse eingestellt werden, so muss die nächst höhere, einstellbare Schwungmasse herangezogen werden. Diese darf eine maximale Zunahme von 10 kg nicht überschreiten.

Im Vergleich zum nahezu stufenlosen Schwungmassen-Ansatz (Prüfmasse gleich Schwungmasse) bei der WLTP-Prüfprozedur werden im NEFZ gestufte Schwungmassenklassen entsprechend der Bezugsmasse des Fahrzeugs vorgegeben. Die Bezugsmasse im NEFZ unterscheidet sich von der Prüfmasse im WLTP insofern, dass sie lediglich die Masse des fahrbereiten Fahrzeugs ohne Fahrer zuzüglich eines Pauschalgewichts von 100 kg umfasst. Die Masse optional erhältlicher Zusatzausstattung und eine variable Masse zur Berücksichtigung der Zuladung bleiben unberücksichtigt. Ist eine entsprechende äquivalente Schwungmasse auf dem Prüfstand nicht einstellbar, wird im NEFZ der unmittelbar über der Bezugsmasse liegende Wert eingestellt.

13.2.3 Einstellungen zur Ermittlung des Rollwiderstandes

Gemäß GTR-Entwurf werden die innerhalb einer CO₂-Fahrzeugfamilie angebotenen Fahrzeugreifen der bisher gültigen Klassen C1, C2 und C3 in sogenannte Rollwiderstandsklassen (RRC) entsprechend dem gemessenen Rollwiderstandskoeffizienten eingeordnet. Sofern das Reifenangebot einer CO₂-Fahrzeugfamilie mehrere RRC betrifft, wird für die Prüfprozedur ein Reifen aus der höchsten RRC ausgewählt. Für die realen Testfahrzeuge fließt der tatsächliche Rollwiderstand des entsprechenden Reifens in die Berechnungen ein. Für individuelle Fahrzeuge im Rahmen der CO₂-Interpolationsmethode wird ein fest definierter Standardwert für die RRC gemäß GTR herangezogen. Der Zustand der Reifen darf nicht älter als 2 Jahre nach Produktionsdatum sein. Die Reifen dürfen nicht vorkonditioniert werden, z.B. durch Aufwärmen, und sollten eine Mindesteinlaufstrecke von 200 km vorweisen. Die Profiltiefe sollte gleichmäßig vorhanden sein und zwischen 80 % und 100 % der Originalprofiltiefe

betragen. Sowohl Vorder- und Hinterräder müssen zum unteren Reifendrucklimit laut Herstellerangabe gefüllt sein.

Die Reifenauswahl im WLTP basiert insgesamt auf dem worst-case Prinzip gemäß Rollwiderstandsklassen. Gegenüber dem NEFZ, welcher lediglich die Auswahl des breitesten bzw. zweitbreitesten (bei mehr als drei angebotenen Reifengrößen) vorsieht, ist die Reifenauswahl in Hinblick auf die Rollwiderstandseigenschaften stärker reguliert.

13.2.4 Einstellungen zur Ermittlung des Luftwiderstandes

Innerhalb einer Fahrzeugfamilie wird das Fahrzeug mit dem höchsten Luftwiderstand als H-Fahrzeug zertifiziert. Bewegliche Teile mit Aerodynamikfunktion (z.B. automatisch ausfahrende Heckspoiler) sind gemäß dem Geschwindigkeit-Zeit-Profil zu betreiben. Bei Verwendung der Interpolationsmethode ist als L-Fahrzeug das Fahrzeug mit dem geringsten Luftwiderstand anzusetzen. Für jedes individuelle Fahrzeug sind dann die spezifisch verbauten Aerodynamik-Optionen anzusetzen. Der gesamte Luftwiderstand ergibt sich für das individuell zu zertifizierende Fahrzeug aus dem Luftwiderstand des Basisfahrzeugs und der Summe der Luftwiderstände der entsprechenden Anbauteile.

13.2.5 Gangwechselstrategie

In Anbetracht der technischen Weiterentwicklung und zunehmenden Vielfalt der Getriebevarianten in modernen Pkw erscheint die Definition fixer Gangwechselzeitpunkte in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit im NEFZ überholt. Aus diesem Grund wird im Rahmen der WLTP-Prüfprozedur für manuelle Handschaltgetriebe und Halbautomatikgetriebe ein Kalkulationstool zur Berechnung des einzulegenden Ganges und des Gangwechselzeitpunkts verwendet. In die entsprechende Gleichung fließen die maximale Motor-Nennleistung, die Motornennendrehzahl, die Leerlaufdrehzahl, die Anzahl der Vorwärtsgänge, die Prüfmasse (TM) des Fahrzeugs, die Fahrwiderstandsparameter sowie die auf die Nennleistung normierte Volllastkurve als Funktion der normierten Motordrehzahl ein [STV13]. Auf diese Weise kann eine große Bandbreite von Motordrehzahlen (z.B. 3.200 bis 8.000 min⁻¹) in Abhängigkeit der eingesetzten Motortechnologie abgebildet werden. Gegenüber dem NEFZ können insbesondere Getriebevarianten mit höherer Gangzahl (mehr als 5 Gänge) in allen Getriebestufen während des Testzyklus durchlaufen werden.

Fahrzeuge mit Automatikgetriebe sollen den WLTC im „predominant drive“ Betriebsmodus durchfahren. Der „predominant drive“ Betriebsmodus wird beim Starten des Fahrzeugs unabhängig vom zuletzt eingestellten Betriebsmodus beim Abstellen des Fahrzeugs automatisch vorgegeben. Sofern ein Fahrzeug nicht über einen entsprechenden Betriebsmodus verfügt, werden Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen als arithmetisches Mittel im energieeffizientesten und ineffizientesten Getriebe-Modus bestimmt. Dadurch wird in der WLTP-Prüfprozedur z.B. der unterschiedliche Energiebedarf im Sport- bzw. Eco-Betriebsmodus berücksichtigt.

13.3 Anwendung der WLTP auf Hybridfahrzeuge

Hybridfahrzeuge (HEV) werden in der GTR in nicht extern aufladbare (Not off-vehicle charging, NOVC) und extern aufladbaren (Off-vehicle charging, OVC) unterschieden, welche in ihrer Definition mit Mild- und Full-Hybriden bzw. PHEV / REEV bzw. vergleichbar sind. Zusätzlich wird die Gruppe der rein elektrisch betriebenen Fahrzeuge (pure electric vehicle, PEV) definiert. Diese sind grundsätzlich alle der PMR-Klasse 3 zugeordnet und durchfahren entsprechend ihrer erreichbaren Höchstgeschwindigkeit den jeweiligen WLTC mit den Phasen Low, Medium, High, Extra-High. Zur Messung der Reichweite von OVC-HEV und PEV müssen die Fahrzeuge einen Zyklus bestehend aus Low und Medium Phase durchfahren.

Grundsätzlich müssen PHEV im Charge-Depleting (CD) und Charge-Sustaining (CS) Betriebsmodus getestet werden. Der Charge-Depleting-Modus ist dadurch gekennzeichnet, dass der Ladezustand der Batterie zwar schwanken kann, im Mittel aber sinkt. Im Charge-Sustaining-Modus sind ebenso Schwankungen der Batterieladung möglich, im Mittel bleibt der Ladezustand jedoch konstant. Diese Begriffe sind daher nicht in allen Fällen deckungsgleich mit dem des rein batterieelektrischen bzw. verbrennungsmotorisch unterstützten Betriebsmodus.

Das Ende des CD-Modus wird dann erreicht, wenn der sog. „Relative Net Energy Change“ (NEC) als Kennzahl unter einen kritischen Prozentwert fällt. Hierzu gilt Gl. 13-3. Demnach ist das Ende des CD-Betriebsmodus erreicht, wenn die Nettoenergieveränderung 4 % unterschreitet.

$$\text{Relativer NEC} = \left(\frac{\text{Ladungsbilanz im letzten Zyklus} \cdot \text{Nennspannung Batterie}}{\text{gesamter Energiebedarf des Fahrzeugs im Zyklus}} \right) \cdot 100 < 4 \% \quad \text{Gl. 13-3}$$

Mit aufgeladener und innerhalb definierter Restriktionen vorkonditionierter Batterie wird der Charge-Depleting-Test gestartet. Wiederholt wird der WLTC durchfahren. Das Ende des CD-Tests gilt am Ende des Zyklus n als erreicht, wenn im darauf folgenden Zyklus n+1 das genannte Abbruchkriterium greift. Der Zyklus n wird auch als Übergangszyklus bezeichnet. In diesem kann auch teilweise verbrennungsmotorisch unterstützt gefahren werden, d.h. im gemischten CD/CS-Betrieb. Die Emissionen im CD-Test, auch im Übergangszyklus, werden getrennt nach den einzelnen Phasen (Low, Middle, High, Extra-High) und einzelnen WLTP-Zyklen (1 bis n) erfasst.

Vor dem CD-Test, mit zeitlichem Abstand oder direkt danach, wird der CS-Test durchgeführt, d.h. das Fahrzeug wird im Betriebsmodus mit annähernd gleichbleibendem Batterieladezustand betrieben. Nicht zu vermeidende Unterschiede des Ladezustandes der Batterie am Ende des CS-Tests im Vergleich zum initialen Zustand werden durch festgelegte Faktoren in äquivalente CO₂-Emissionen umgerechnet. Auch im CS-Test erfolgt eine detaillierte Dokumentation der CO₂-Emissionen.

Der Kraftstoffverbrauch bzw. die CO₂-Emissionen aus CD-Test und CS-Test werden anschließend über Nutzungsfaktoren (engl. Utility Factors, UF) unterschiedlich gewichtet und

miteinander verrechnet, um die entsprechenden kombinierten Werte für ein PHEV zu bestimmen.

Der gewichtete Kraftstoffverbrauch für PHEV ergibt sich gemäß nachfolgender Gl. 13-4.

$$KV_{\text{gewichtet}} = \sum_{j=1}^k (UF_j \cdot KV_{\text{CD},j}) + \left(1 - \sum_{j=1}^k UF_j\right) \cdot KV_{\text{CS}} \quad \text{Gl. 13-4}$$

- Mit $KV_{\text{gewichtet}}$: Mit dem Nutzungsfaktor gewichteter Kraftstoffverbrauch in l/100 km
 UF_j : Anteiliger Nutzungsfaktor der Zyklusphase j
 $KV_{\text{CD},j}$: Gemessener Kraftstoffverbr. im CD-Modus während Phase j in l/100 km
 KV_{CS} : Gemessener Kraftstoffverbr. im CS-Test in l/100 km
j: Indexnummer jeder Zyklusphase bis zum Ende des Übergangszyklus n
k: Anz. der verbleibenden Phasen bis zur letzten Phase des Übergangszyklus n

Der CO₂-Emissionsausstoß für PHEV ergibt sich analog gemäß nachfolgender Gl. 13-5.

$$CO_{2,\text{gewichtet}} = \sum_{j=1}^k (UF_j \cdot CO_{2,\text{CD},j}) + \left(1 - \sum_{j=1}^k UF_j\right) \cdot CO_{2,\text{CS}} \quad \text{Gl. 13-5}$$

- Mit $CO_{2,\text{gewichtet}}$: Mit dem Nutzungsfaktor gewichtete CO₂-Emissionen in g/km
 UF_j : Anteiliger Nutzungsfaktor der Zyklusphase j
 $CO_{2,\text{CD},j}$: Gemessene CO₂-Emissionen während im CD-Modus während Phase j in g/km
 $CO_{2,\text{CS}}$: gemessene CO₂-Emissionen im CS-Test in g/km
j: Indexnummer jeder Zyklusphase bis zum Ende des Übergangszyklus
k: Anzahl der verbleibenden Phasen bis zur letzten Phase des Übergangszyklus

Nach jeder abgeschlossenen Phase werden der Kraftstoffverbrauch bzw. die CO₂-Emissionen im CD-Test gemessen und der Utility-Faktor bestimmt. Die Messergebnisse werden anschließend mit der Differenz aus dem Utility-Faktor der aktuellen und der vorherigen Phase bewertet. Das Vorgehen ist beispielhaft für die Berechnung der gewichteten CO₂-Emissionen eines PHEV in Abb. 13-6 für einen CD-Test über zwei Testzyklen bzw. 8 Zyklusphasen illustriert.

Obwohl bereits quantitative Vorschläge für die Ausgestaltung der Utility-Faktoren in Europa vorliegen, sind diese noch kein Bestandteil der im März 2014 angenommenen GTR. Es herrscht jedoch ein Konsens darüber, dass der Utility-Faktor nicht weltweit einheitlich, sondern vielmehr regionalen Gegebenheiten entsprechend definiert werden soll. Auf diese Weise soll unterschiedlichen statistischen Verteilungen der Fahrzeugnutzung entsprochen werden können.

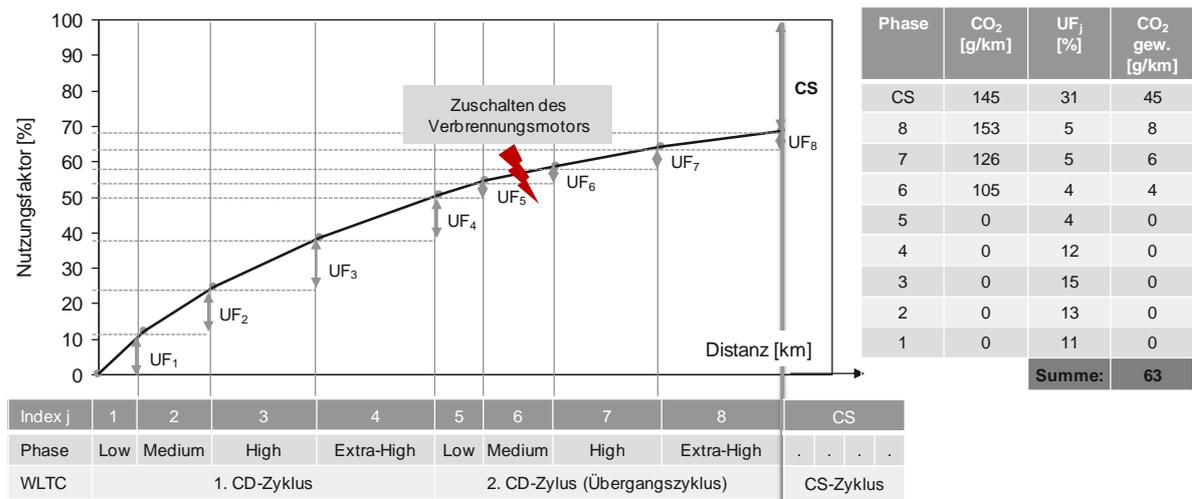


Abb. 13-6: Berechnung der gewichteten CO₂-Emissionen für PHEV mittels Utility-Faktor

Zur Bestimmung der Utility-Faktoren in Europa werden im Wesentlichen zwei Datenquellen herangezogen. Zum einen im Rahmen der WLTP-Prüfprozedur erhobene Daten, zum anderen Datenauswertungen aus dem Fiat Eco Drive-Programm. Zusätzliche Ansatzpunkte zur Datenvalidierung werden aus der Datenerhebung „Mobilität in Deutschland“ gewonnen. Abb. 7-7 zeigt den vorgeschlagenen Utility-Faktor („WLTP + FIAT“) für die EU auf Basis der kombinierten Einzeldaten der WLTP-Datenbank und des Fiat Eco Drive-Programms [ACE14].

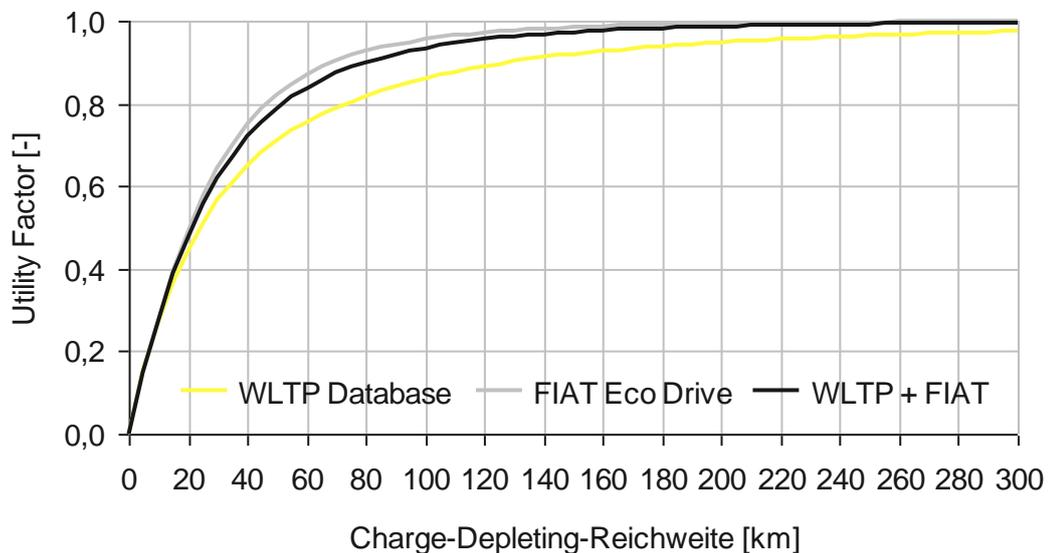


Abb. 13-7: Vorschlag für den Verlauf des Utility-Faktors in der EU [ACE14]

13.4 Zusammenfassung WLTP

Mit der geplanten Einführung der Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) sollen ab 2017 international vereinheitlichte und praxisnahe Angaben über den Kraftstoffverbrauch bzw. die CO₂-Emissionen ermöglicht werden. Nach aktuellem Diskussionsstand ist das Geschwindigkeit-Zeit-Profil im WLTP wesentlich dynamischer gestaltet als das des NEFZ und wird ferner mit einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit gefahren. Die Gangwechsellvorschriften erfolgen im WLTP auch auf Basis fahrzeugspezifischer Daten und ermöglichen so tendenziell effizientere Betriebspunkte.

Änderungen der Messprozedur betreffen vorrangig die signifikante Erhöhung der Fahrzeugprüfmasse durch Berücksichtigung der optionalen Sonderausstattung und der anteiligen Zuladung. Nebenverbraucher, z.B. die Klimaanlage oder das Abblendlicht, bleiben jedoch auch im WLTP ausgeschaltet.

Die Methodik zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen für Plug-in-Hybride und Fahrzeuge mit Range-Extender wird im WLTP neu gestaltet. Hierzu werden getrennt Messungen im Charge-Depleting-Modus (Betrieb mit sinkendem Batterieladezustand) und Charge-Sustaining-Modus (Betrieb mit tendenziell gleichbleibendem Batterieladezustand) durchgeführt und die jeweiligen Zyklus-Verbräuche bzw. CO₂-Emissionen durch Nutzungsfaktoren miteinander verrechnet. Die Höhe dieser Nutzungsfaktoren befindet sich in der internationalen Abstimmung.