

Technikkostenschätzung für die CO₂-Emissionsminderung bei Pkw

- Emissionsminderungspotenziale und ihre Kosten-

Eine Studie des Umweltbundesamtes

6. August 2008

Umweltbundesamt

Fachgebiet I 3.2 – Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr

Wörlitzer Platz 1

06844 Dessau-Roßlau

Autoren: Reinhard Herbener, Helge Jahn, Frank Wetzel

Inhalt

1	Anlass.....	2
2	Vorgehen.....	3
2.1	Minderungspotenziale und Kosten einzelner Maßnahmen.....	3
2.2	CO ₂ -Emissionsminderungspotenzial und Kosten eines Maßnahmenpaketes 5	
2.3	Kombinatorik der Einzelmaßnahmen	6
2.4	Bestimmung der Kostenkurven	6
2.5	Ergebnisse	8
2.6	Einschränkungen.....	8
3	Ergebnisdiskussion.....	9
3.1	Otto-Pkw	10
3.2	Diesel-Pkw	12
4	Zusammenfassung und Fazit	13
5	Quellen	14
6	Anlagen	15

1 Anlass

Am 19.12.2007 schlug die Europäische Kommission eine Regelung zur Reduzierung der CO₂-Emissionen von Pkw vor. Demnach wird ab 2012 für alle Fahrzeuge - in Abhängigkeit ihrer Masse - ein maximal erlaubter Emissionswert in gCO₂/km berechnet. Jeder Hersteller, der in der Summe seiner Neuzulassungen je Jahr höhere spezifische Emissionen hat als die Summe der maximal erlaubten Emissionswerte, hat je überschrittenem gCO₂/km einen Strafbetrag an die Kommission zu entrichten. 2012 soll der Strafbetrag 20 €/(gCO₂/km) betragen und bis 2015 stufenweise auf 95 €/(gCO₂/km) ansteigen.

Verschiedene Seiten kritisierten die Höhe der Strafbeträge. Die Kommission leitete sie aus einer Studie von TNO et al.¹ [8] ab und bildete dabei aus den Kosten und CO₂-Emissionsminderungspotenzialen einzelner Techniken zur Effizienzsteigerung bei Pkw Vermeidungskostenkurven. Die Kostenangaben zu den Techniken geben jedoch den Stand von etwa 2004 wieder.

TNO ging davon aus, dass die Selbstverpflichtungen der Autoherstellerverbände eingehalten werden, 2008/9 also 140 gCO₂/km erreicht sein würden.

Das UBA nahm mit Bericht vom 19.04.2007 Stellung zu den Mehrkosten, die die Hersteller aufwenden müssen, wenn sie ihre Neufahrzeuge 20 % effizienter auslegen. Im Ergebnis wurden Mehrkosten von wenigen Hundert € je Fahrzeug erwartet, also weit aus weniger, als die von der TNO prognostizierten Kosten i.H.v. über 1.000 €.

Dieser Bericht enthält eine Aktualisierung der Kostenschätzungen für die Maßnahmen sowie die Ermittlung von Kostenkurven in einer mit TNO vergleichbaren Art und Weise. Es sind ausschließlich Techniken berücksichtigt, die sich bei einer Verbrauchsmessung im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) auswirken.

¹ TNO et al. [8] wird im Folgenden nur als TNO bezeichnet

2 Vorgehen

Dieser Bericht knüpft an die UBA-Stellungnahme vom 19.04.2007 an. Aktualisiert werden die CO₂-Emissionsminderungspotenziale und die zugehörigen Kosten aller Techniken, die kurzfristig - bis 2012 - einsetzbar sind. Die Angaben sind nach Otto- und Diesel-Pkw und, soweit möglich, nach kleinen, mittleren und großen Fahrzeugen differenziert erhoben². Soweit die größenabhängige Differenzierung nicht möglich war, wurde sie mithilfe der in TNO angegebenen Kostenspreizungen für die jeweilige Technik geschätzt [8, S. 50/51].

Mit Maßnahmenpaketen sind größere Effizienzsteigerungen zu teils geringeren Kosten darstellbar als mit Einzelmaßnahmen. Aus den einzelnen Maßnahmen werden deshalb sinnvolle Maßnahmenpakete gebildet sowie deren Gesamt-Minderungspotenziale und Kosten ermittelt. Die Punktwolke aller Maßnahmenpakete ist Grundlage zur Bestimmung der Kostenkurve der Hersteller.

Analog zu TNO bestimmen wir für jede Klasse eine kontinuierliche Kurve in Form eines Polynoms dritten Grades, die die Hersteller-Zusatzkosten je Pkw (in €) als Funktion der CO₂-Reduktion (in gCO₂/km) angibt. Hieraus ist ableitbar, welche Kosten zum Erreichen eines vorgegebenen Effizienzniveaus im Durchschnitt aller Pkw der jeweiligen Klasse anzunehmen sind.

2.1 *Minderungspotenziale und Kosten einzelner Maßnahmen*

Zur Ermittlung der aktuellen Minderungspotenziale und Kosten der Maßnahmen zur Effizienzverbesserung an Pkw führte das UBA eine umfangreiche Literaturrecherche durch. Zusätzlich erbaten wir Experteneinschätzungen von Forschungsinstituten und der Autozulieferindustrie.

Preise und Potenziale gehen vom jetzt (2007/2008) üblichen technischen Stand der Pkw in den o.g. Klassen aus (Tabelle 1). Einzelne Maßnahmen können bei einem Teil der Pkw schon umgesetzt sein, nicht aber bei der Mehrheit der Pkw der Klasse. Diese Vereinfachung ist erforderlich, um allgemeingültige Kostenkurven aufstellen zu können. Allerdings ist es dann nicht möglich, aus den Kostenkurven auf die zusätzlichen Belastungen eines konkreten Herstellers für ein konkretes Fahrzeug oder Modell zu schließen.

Die technischen Spezifikationen der Basis-Pkw je Klasse und ihre durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen je km sind in Tabelle 1 aufgeführt.

² Otto-Pkw (klein, mittel, groß) und Diesel-Pkw (klein, mittel, groß) werden im Folgenden als Klassen bezeichnet. Die Differenzierung nach der Größe erfolgt anhand des Hubraums: <1,4 l; 1,4...2,0 l; >2,0 l.

Tabelle 1: Technische Spezifikation der Basisfahrzeuge. Zusammenstellung aus den in Deutschland verkaufstärksten Modellen der Klassen (inkl. Importfahrzeuge).

	Otto, klein	Otto, mittel	Otto, groß	Diesel, klein	Diesel, mittel	Diesel, groß
Motor	4-Zyl. Reihe	4-Zyl. Reihe	4-Zyl. Reihe	4-Zyl. Reihe	4-Zyl. Reihe	V6, V8-Zyl.
Aufladung	Nein	Nein (z.T. Turbo-aufladung)	Nein (z.T. Turbo-aufladung)	Turbo-aufladung	Turbo-aufladung	Turbo-aufladung
Kraftstoff-einspritzung	Multipoint (z.T. Direkt)	Multipoint (z.T. Direkt)	Multipoint, (z.T. Direkt)	Direkt-einspritzung	Direkt-einspritzung	Direkt-einspritzung
Schaltung	5 Gang, Handschalt	5 / 6 Gang, Handschalt	6 (7) Gang, Automatik, (z.T. Stufenlos)	5 (6) Gang, Handschalt	6 (5) Gang, Handschalt	6 (7) Gang, Automatik, (z.T. Stufenlos)
CO₂ (g/km) 2006 in D	144,4	176,9	222,6	121,9	156,1	214,7
CO₂ (g/km) 2006 in EU³	143,9	179,0	230,6	122,3	150,1	211,0
Anzahl NZL 2007 in D⁴	746.392	718.587	157.297	47.237	998.646	455.683

Techniken in (): kommen in einzelnen Modellen vor

In den im Folgenden betrachteten Herstellerkosten sind alle direkten Kosten des Autoproduzenten (Kosten für Materialien, Werkzeug, Komponenten, Arbeitskraft) enthalten. Die Kosten beziehen sich auf Deutschland. Sie können von Kosten in anderen EU-Mitgliedstaaten abweichen, z.B. wegen anderer Steuersätze, anderer Anreize für Konsumenten (z.B. Wirkung durch Label, Preise, Image) und anderer nationaler Förderpolitiken (z.B. Prämien für Neuwagen mit bestimmten spezifischen CO₂-Niveaus).

Kostendegressionen durch Großserien (economies of scale) und die damit verbundene Optimierung von Industrieprozessen sowie Materials substitutionen haben wir in der Kostenschätzung berücksichtigt. Hinsichtlich zukünftiger Kostenentwicklungen bergen gerade die economies of scale große Unsicherheiten. Massenproduktion bestimmter Techniken in Verbindung mit intensiver Forschung und Entwicklung kann die Kosten um Größenordnungen senken.

Analog TNO haben wir Literaturangaben mit Endkundenpreisen (retail prices) mit dem Faktor 1/1,44 auf Herstellungsmehrkosten umgerechnet.

Die Potenziale und Herstellermehrkosten einzelner effizienzsteigernder Maßnahmen an Otto-Pkw sind in Anlage 1 zusammengefasst, die für Diesel-Pkw in Anlage 2. In eckigen Klammern sind die Quellen der Aussagen vermerkt, siehe Abschnitt 5.

³ [43] Zierock und DLR, 2007. Klasseneinteilung nach der Systematik der Polk Marketing Systems Data GmbH.

⁴ [42] KBA, 2007

Viele Maßnahmen dienen nicht nur der Effizienzverbesserung, sondern sie tragen auch zur Geräuschminderung, besseren Fahrbarkeit oder zum gesteigerten Komfort bei. TNO lastet dann nur einen Teil der Kosten der Maßnahme der CO₂-Emissionsminderung an. So schreibt die TNO z.B. für die variable Ventilsteuerung 25 % der Gesamtkosten der Minderung der gesetzlich regulierten Schadstoffe zu, und lastet dem Ziel der CO₂-Emissionsminderung nur 75 % der Kosten der Maßnahme an. Unsere Analyse geht analog vor. Die der CO₂-Emissionsminderung angerechneten Kostenanteile sind in den Anlagen 1 und 2 nach dem Vorgehen der TNO ausgewiesen.

2.2 CO₂-Emissionsminderungspotenzial und Kosten eines Maßnahmenpaketes

Zur Identifikation möglicher Maßnahmenpakete haben wir zunächst die Abhängigkeiten zwischen den Einzelmaßnahmen bestimmt. Anlage 3 stellt diese Abhängigkeiten für Fahrzeuge mit Ottomotoren und Anlage 4 für Diesel-Pkw dar. Ihre Potenziale sind multiplikativ verknüpft, wenn die Maßnahmen unabhängig voneinander wirken. Sie sind in den Tabellen der Anlagen mit „+“ gekennzeichnet. Die Berechnung entspricht dem TNO-Ansatz:

$$CO_2^{package} = CO_2^{baseline} \times \prod_{i=1}^n (1 - \delta_i)$$

Kombinationen von sich gegenseitig ausschließenden Einzelmaßnahmen sind mit „-“ gekennzeichnet; sie gehen nicht in die weitere Berechnung ein.

Schließlich gibt es auch Maßnahmen, die einander beeinflussen, da sie das gleiche Potenzial abgreifen. So schränkt beispielsweise ein Latentwärmespeicher das Emissionsminderungspotenzial von Leichtlaufölen ein, da deren verbrauchsmindernde Wirkung insbesondere in der Kaltlaufphase zum Tragen kommt. Solche Abhängigkeiten sind mit „!“ vermerkt. Die gegenseitige Beeinflussung fällt je nach Kombination unterschiedlich stark aus. Für diese Kombinationen wurden eigene Minderungspotenziale geschätzt, s. Anlagen 1 und 2. Wie TNO mit nicht sinnvollen Maßnahmenpaketen verfuhr, ist nicht eindeutig belegt.

Die Herstellungskosten werden analog zur TNO-Studie für alle Maßnahmenpakete mit „+“ oder „!“ als Summe der Herstellungskosten der Einzelmaßnahmen berechnet:

$$cost^{package} = \sum_{i=1}^n cost_i$$

2.3 Kombinatorik der Einzelmaßnahmen

Die Vielzahl der zur Effizienzsteigerung einsetzbaren technischen Einzelmaßnahmen führt zu sehr vielen möglichen Maßnahmenpaketen. Betrachtet man nur die Einzelmaßnahmen aus den Bereichen „Motor“ und „Sonstiges“, so ergeben sich aus den 13 Maßnahmen (Ottomotor) und 10 Maßnahmen (Dieselmotoren) mit jeweils zwei möglichen Auslegungen (mit/ohne) $2^{13} = 8.192$ und $2^{10} = 1.024$ mögliche Kombinationen. Bezieht man die 5 möglichen Getriebeausprägungen (Basis/ optimierte Getriebeauslegung/ CVT Getriebe/ Doppelkupplungsgetriebe (DSG)/ optimierte Getriebe-
regelung mit Doppelkupplungsgetriebe) ein, so vervielfachen sich die Zahlen möglicher Kombinationen. Die Einbeziehung der 4 Hybridausprägungen (ohne/ Start-Stop-System/ Mild-Hybridisierung/ Full-Hybridisierung) führt zu einer weiteren Vervielfachung. Insgesamt ergeben sich kombinatorisch 163.840 verschiedene Maßnahmenpakete für Otto- und 20.480 für Dieselmotoren.⁵

Wegen der hohen Variantenanzahl kam nur eine EDV-gestützte Berechnung in Betracht. Diese haben wir über VBA-Makros realisiert. Sie lieferten Emissionsminderungspotenziale und Herstellungskosten gemäß den bisher gestellten Vorgaben für alle Varianten. Die Anlagen 5 bis 10 stellen die Ergebnisse für die sechs Fahrzeugklassen (Otto-/Diesel-Pkw) * (kleine, mittlere, große) als Punktwolken dar. Die TNO-Studie verwendet ähnliche Punktwolken.

2.4 Bestimmung der Kostenkurven

TNO bestimmt für jede Klasse eine kontinuierliche Kurve, die die Hersteller-Zusatzkosten je Pkw (in €) als Funktion der CO₂-Reduktion (in gCO₂/km) angibt. Als Ansatz wählte TNO ein Polynom dritten Grades

$$y = ax^3 + bx^2 + cx$$

mit der Einschränkung, dass die Kurve durch den Koordinatenursprung verläuft. Die nachfolgenden Berechnungen nutzen ebenfalls diesen Ansatz. Zur vollständigen Bestimmung der Kostenkurve ist es nun notwendig, die Koeffizienten a, b und c festzulegen. Deren Herleitung ist im TNO-Bericht nicht eindeutig belegt.

Festlegung der Freiheitsgrade durch Restriktionen

Aus den drei Koeffizienten des Ansatzes ergeben sich drei Freiheitsgrade für die Festlegung der Kostenkurven. Um eine konkrete Kostenkurve bestimmen zu können, ist es daher notwendig, drei Restriktionen zu definieren, die diese Freiheitsgrade einschränken.

Die *erste Restriktion* ergibt sich analog zur TNO-Studie aus der Annahme, dass die Hersteller sich bei der Umsetzung von Maßnahmenpaketen nicht am unteren - billigen - Rand der Kurve (der Maßnahmenpakete) bewegen, sondern dass sie gegebenenfalls teurere Pakete wählen, wenn diese marktgerechter sind. Die TNO-Studie quantifiziert das, indem sich ein Drittel der Punktwolke unterhalb und zwei Drittel oberhalb der Kurve befinden soll. Wir gehen genauso vor.

Als *zweite Restriktion* gilt, dass am Koordinatenursprung der Anstieg der Kostenkurve 0 betragen soll. Diese Festlegung ist sinnvoll, da Einzelmaßnahmen existieren, für die keine Kosten anfallen. Für die Koeffizienten bedeutet diese Restriktion, dass c

⁵ Die „Maßnahme“, dass nichts am Basisfahrzeug geändert wird, ist mit enthalten.

den Wert 0 bekommt. Die TNO-Studie enthält für c auch Werte, die größer als 0 sind. Deren Maßnahmenkatalog enthält keine kostenlosen Maßnahmen.

Als *dritte Restriktion* bestimmten wir, dass die Kurve durch das Maßnahmenpaket mit dem höchsten Emissionsminderungspotenzial verlaufen soll. Die Höhe dieses Potenzials ist für den Hersteller nur durch den Einsatz aller Einzelmaßnahmen zu erreichen. Es ergibt sich daher kein Spielraum für den Kurvenverlauf.

Berechnung der Koeffizienten

Der Koeffizient c lässt sich direkt aus der zweiten Restriktion ableiten. Der Anstieg am Koordinatenursprung soll 0 sein. Es gilt:

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= 0 \\ \frac{d(ax^3 + bx^2 + cx)}{dx} &= 0 \\ 3ax^2 + 2bx + c &= 0 \\ c &= 0\end{aligned}$$

Die dritte Restriktion liefert einen Zusammenhang zwischen a und b, der es ermöglicht b aus einem gegebenen a zu ermitteln. Es gilt:

$$\begin{aligned}y_{\max} &= ax_{\max}^3 + bx_{\max}^2 \\ y_{\max} - ax_{\max}^3 &= bx_{\max}^2 \\ b &= \frac{y_{\max} - ax_{\max}^3}{x_{\max}^2}\end{aligned}$$

Daher bleibt nur noch, a über die erste Restriktion zu bestimmen. Dies haben wir durch ein VBA-Makro realisiert. Das Makro führt eine Zielwertsuche durch. Dabei wird der Koeffizient a so lange verändert, bis die Kurve (bei ständig angepasstem b gemäß obiger Formel) so liegt, dass ein Drittel der Punktwolke unterhalb und zwei Drittel oberhalb der Kurve liegen.

2.5 Ergebnisse

Wir ermittelten die Koeffizienten a und b für jede Klasse; c ist per Definition 0 (Tabelle 2). Werden die Koeffizienten in das Polynom dritten Grades in Abschnitt 2.4 eingesetzt, erhält man die Kurven für die Hersteller-Zusatzkosten je Pkw (in €) als Funktion der CO₂-Reduktion (in gCO₂/km).

Tabelle 2: Resultierende Koeffizienten zur Bestimmung der Kostenkurven für die Hersteller-Zusatzkosten.

Hubraum	Ottomotor			Dieselmotor		
	a	b	c	a	b	c
<1,4 l	0,001887	0,282310	0	0,004124	1,042238	0
1,4...2 l	0,00138	0,199462	0	0,002541	0,787621	0
>2 l	0,000948	0,124012	0	0,000860	0,455337	0

Die so ermittelten Kostenkurven je Klasse sind aus den Anlagen 5 bis 10 ersichtlich. Bei vorgegebener Emissionsminderung - in gCO₂/km - sind die Kosten direkt ablesbar oder mithilfe der Koeffizienten berechenbar.

2.6 Einschränkungen

Die breit gestreuten Punktwolken der Anlagen 5 bis 10 verdeutlichen eine Einschränkung in der Interpretation der Kostenkurven: Will man z.B. die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen der mittelgroßen Otto-Pkw (Anlage 6) von 176,9 g/km (Tabelle 1) um 37 g/km auf 140 g/km reduzieren, so können dem Hersteller je nach gewähltem Maßnahmenpaket Kosten von ca. 50 bis zu ca. 2000 € entstehen. Große Kostenbandbreiten ergeben sich für alle Emissionsminderungen zwischen 20 und 90 gCO₂/km.

Die tatsächlich entstehenden Kosten können daher allenfalls hinsichtlich ihrer ungefähren Größenordnung ermittelt werden. Die Kostenkurven sind jedoch zum Vergleich der Klassen untereinander geeignet.

Werden die Kostenkurven auf den Kommissionsvorschlag angewendet, ist ein weiterer Aspekt zu beachten. Da der Vorschlag die zulässigen CO₂-Emissionen auf die Masse des jeweiligen Fahrzeugs bezieht, sind Maßnahmen, die Gewichtsveränderungen zur Folge haben, aus Sicht des Herstellers anders zu werten.

Z.B. könnte ein Pkw mittlerer Größe durch die Maßnahme „5 % Gewichtsreduktion“ ca. 70 kg leichter werden⁶. Der gemäß Vorschlag für diesen Pkw maximal erlaubte Emissionswert sänke zugleich um 3,2 g/km. Erwägt der Hersteller Leichtbaumaßnahmen, wird er den Kostensatz für die Strafzahlung einkalkulieren. Er wird solche Maßnahmen nur dann realisieren, wenn sie zusätzlich diese Strafzahlungen aufwiegen. Für 2012 liegt der Kostensatz bei 20 €/gCO₂/km. Daraus ergäbe sich für den Hersteller eine zusätzliche Belastung von 64 €, die er zu den Kosten der technischen

⁶ Das durchschnittliche Leergewicht aller 2006 in Deutschland neu zugelassenen Pkw liegt nach eigenen Berechnungen bei ca. 1.392 kg.

Maßnahme von 80 € addieren müsste⁷. Eine Gewichtsreduktion um 5 % „kostet“ den Hersteller 2012 in diesem Beispiel ca. 144 €.

Downsizing und evt. die Getriebewahl können ebenfalls zu Gewichtsreduktionen führen, sodass sie für den Hersteller relativ teurer würden. Die Mild- und Vollhybridisierung erhöht gleichzeitig das Fahrzeuggewicht und wird für die Hersteller deshalb attraktiver. IAV [39] gibt das Mehrgewicht durch Vollhybridisierung eines Diesel-Pkw mit einem Elektromotor von 50 kW Leistung und ausreichender Dimensionierung der Batterie mit ca. 300 kg an. Zugleich ermöglichen dann ein Downsizing des Verbrennungsmotors und die Reduktion des Tankvolumens Gewichtseinsparungen im Umfang von ca. 100 kg. Die zusätzlichen 200 kg erhöhen den maximal erlaubten Emissionswert zugleich um 6,4 g/km, was für den Hersteller über die vermiedene Strafzahlung einen positiven Gegenwert von 128 € bedeutet. Da TNO die Kosten der Vollhybridisierung gemäß TNO nur zu 75 % auf die CO₂-Emissionsreduktion anrechnet, kostet eine solche Ausstattung für große Dieselfahrzeuge also nicht 3.000 €, sondern 2.872 € (2012). Gerade in der Energiespeicherung und der Leistungselektronik liegen noch große Kostenminderungspotenziale für die Vollhybridisierung [39, 40].

Würden die Neuzulassungen auf breiter Front vollhybridisiert, löste das einen Schub bei der durchschnittlichen Erhöhung des Fahrzeug-Leergewichts aus. Als Folge könnte das europäische Ziel von 130 gCO₂/km je neuem Pkw verfehlt werden.

In der Analyse nicht berücksichtigt sind:

- Marktreaktionen auf den Richtlinienvorschlag der Kommission. D.h. Menge und Klassenanteile der Neuzulassungen werden, analog zu TNO, als gleichbleibend angenommen.
- mögliche CO₂-Mehremissionen durch die Euro 5/6 Regelungen und die Kosten, die durch deren Ausgleich entstehen.

3 Ergebnisdiskussion

Konkrete Kostenvergleiche je Hersteller können wir nicht durchführen. Dazu müssten die EU-weiten Daten über deren Anzahl und Verteilung der Neuzulassungen nach den hier gewählten Klassen je Hersteller bekannt sein. Solche Angaben liegen uns nicht vor. Die Anlagen 11 und 12 vermitteln jedoch einen Eindruck vom durchschnittlichen CO₂-Emissionsniveau der Hersteller 2006 und von den erforderlichen CO₂-Emissionsminderungen, damit die Hersteller keine Strafen zahlen müssten.

Da die meisten Hersteller die spezifischen CO₂-Emissionen ihrer Neuwagen um ca. 20 % verringern müssten, haben wir in Tabelle 3 und Tabelle 4 beispielhaft die geschätzten Herstellungsmehrkosten für Otto- und Diesel-Pkw gezeigt und den sich daraus ergebenden Nutzen für die Volkswirtschaft ermittelt.

Die Kosten der Hersteller haben wir analog zu der TNO-Studie nach Fahrzeugklassen differenziert ermittelt und damit für alle Hersteller in gleicher Weise. Nicht berücksichtigt ist dabei das Potenzial zur Minimierung der Kosten für die individuelle Flotte eines Herstellers, das sich aus einer optimierten Verteilung der Emissionsminderungsmaßnahmen und -kosten auf große und kleine Fahrzeuge mit unterschiedlichen Stückzahlen hinsichtlich der Einhaltung des herstellerspezifischen Flotten-

⁷ Die zusätzliche Belastung ergibt sich nur, wenn der Hersteller in der Gesamtheit seiner Neufahrzeuge über seinen maximal erlaubten Emissionen liegt.

grenzwertes ergibt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Poolbildung mehrerer Hersteller, verbunden mit dem Potenzial einer weiteren Kostenminderung, da dann der gemeinsame Durchschnitt Grundlage der Bewertung ist. Die tatsächlichen Kosten werden also in der Realität niedriger sein, als in den folgenden Tabellen angegeben.

Wie eingangs erwähnt, beziehen sich alle Emissionsminderungspotentiale nur auf den NEFZ.

3.1 Otto-Pkw

Folgende Maßnahmen können an Otto-Pkw ohne nennenswerte Zusatzkosten ausgeführt werden:

- Direkteinspritzung -> 5% Potenzial
- optimierte Getriebeauslegung -> 4% Potenzial
- Leichtlaufreifen -> 4% Potenzial
- verbesserte Aerodynamik -> 1% Potenzial

Weitere preiswerte Maßnahmen, die maximal 25 €/(% CO₂ Einsparung) kosten⁸, sind:

Downsizing, Abgasrückführung, Reibungsminderung im Motor, Verbesserung des Wärmemanagements am Motor, variable Ventilsteuerung, variable Verdichtung und die Gewichtsreduktion.

Die meisten dieser kostengünstigen Maßnahmen setzen am Motor an. Hier liegt für Ottofahrzeuge das größte Potenzial. Die Hybridtechnik ist nach gegenwärtigem Stand relativ teuer. Es ist zu erwarten, dass aus diesem Bereich kurzfristig lediglich Start-Stopp-Automatiken verstärkt in Neufahrzeugen auf den Markt dringen. Vollhybride dürften kurzfristig auf das obere Fahrzeugsegment beschränkt bleiben⁹.

Tabelle 3 zeigt beispielhaft, welche Kosten den Herstellern bei 20 % CO₂-Emissionsminderung an Otto-Pkw entstehen:

⁸ Bezogen auf die Hubraumklasse von 1.400 bis 2.000 cm³.

⁹ Image- und marketingstrategische Gründe werden bewirken, dass die Hybridtechnik schneller in den Markt diffundiert und sich auf andere Klassen ausdehnt, als es nach Kosteneffizienz zur CO₂-Minderung sinnvoll wäre. Nahezu alle bedeutenden Hersteller beabsichtigen, zumindest Teile ihrer künftigen Neuwagenflotte voll zu hybridisieren.

Tabelle 3: Herstellermehrkosten für 20% CO₂-Minderung bei Otto-Pkw

Tabelle 3: Herstellermehrkosten für 20% CO₂-Emissionsminderung bei Otto-Pkw

Hubraum	Otto		
	< 1,4 L	1,4 bis 2,0 L	> 2,0 L
Durchschnittliche CO ₂ -Emissionen, 2006	144 g/km	177 g/km	223 g/km
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch	6,1 Liter/100km	7,5 Liter/100km	9,4 Liter/100km
Herstellereinkaufskosten nach UBA für 20% CO ₂ -Minderung	281 €	311 €	329 €
20% CO ₂ -Emissionsminderung	29 g/km	35 g/km	45 g/km
20% Einsparung	1,2 Liter/100km	1,5 Liter/100km	1,9 Liter/100km
Preis je Liter Kraftstoff vor Steuern 03/08	0,530 €	0,530 €	0,530 €
Preis je Liter Kraftstoff nach Steuern 03/08	1,410 €	1,410 €	1,410 €
Pkw-Lebensdauer gemittelt nach TREMOD	12 Jahre	12 Jahre	12 Jahre
Einsparung Kraftstoff über 12 Jahre	1.368 Liter	2.018 Liter	2.925 Liter
Einsparung CO ₂ über 12 Jahre	3,2 Tonnen	4,8 Tonnen	6,9 Tonnen
Pkw-Fahrleistung/Jahr nach TREMOD	9.300 Km	11.200 Km	12.900 Km
Nutzen Volkswirtschaft	725 €	1.070 €	1.550 €
Nutzen Verbraucher	1.929 €	2.846 €	4.124 €
Kosten Volkswirtschaft	281 €	311 €	329 €
Kosten pro Tonne CO ₂ -Einsparung Volkswirtschaft	87 €/Tonne CO ₂	65 €/Tonne CO ₂	48 €/Tonne CO ₂
Nutzen pro Tonne CO ₂ -Einsparung Volkswirtschaft	225 €/Tonne CO ₂	225 €/Tonne CO ₂	225 €/Tonne CO ₂
Einsparung pro Tonne CO ₂ Volkswirtschaft	-138 €/Tonne CO ₂	-160 €/Tonne CO ₂	-177 €/Tonne CO ₂
Herstellereinkaufskosten nach TNO et al	720 €	760 €	910 €

Eine 20%ige Effizienzsteigerung kostet die Hersteller demnach durchschnittlich 280 bis 330 €.

Der volkswirtschaftliche Nutzen, der hier vereinfacht mit den eingesparten Kraftstoffkosten vor Steuern über die Pkw-Lebensdauer von 12 Jahren angesetzt wird, liegt je nach Hubraumklasse bei 725 bis 1.550 €¹⁰. Diesem Nutzen stehen höhere Kosten gegenüber, nämlich die Herstellereinkaufskosten, so dass das volkswirtschaftliche Saldo 280 bis 330 € geringer ist. Verbraucherinnen und Verbraucher könnten, falls sie ihre Pkw 12 Jahre hielten, zwischen ca. 2.000 und ca. 4.000 € an Kraftstoffkosten sparen. Einzurechnen wären u.a. auch der höhere Anschaffungspreis des Pkw, die Zinsbelastung durch den höheren Anschaffungspreis und steuerliche Wirkungen unter der vorgesehenen CO₂-bezogenen Kfz-Steuer.

Die im Vergleich zur UBA-Stellungnahme vom 19.04.2007 höheren Mehrkosten resultieren aus der TNO-Systematik zur Ermittlung der Kostenkurven. Die TNO-Vorgabe, dass 1/3 der Punktwolke aus den Maßnahmenpaketen unterhalb der Kurve liegen muss, verhindert, dass die preiswertesten Maßnahmenpakete „geschnürt“ werden können, wie in der damaligen UBA-Stellungnahme geschehen.

Ein Vergleich der Ergebnisse von UBA und TNO (in Tabelle 3 unterste Zeile) für 20 % Minderung ist eingeschränkt, weil

- die technischen Spezifikationen der Basisfahrzeuge leicht unterschiedlich sind, was sich aus den unterschiedlichen Basisjahren (TNO: 2002, UBA: 2007/8) ergibt,
- die Basis-CO₂-Emissionen folglich unterschiedlich sind. Bei Angabe der Minderungspotenziale in % fallen die absoluten Minderungspotenziale in gCO₂/km unterschiedlich aus, und

¹⁰ Externe Kosten des Pkw-Verkehrs sind hierbei nicht berücksichtigt.

- die Potenziale und Kosten der Maßnahmen sich zwischen 2002 und 2007/8 verändert haben.

Im Vergleich betragen die hier ermittelten Kosten nur 36 bis 41 % der Hersteller-Zusatzkosten gemäß TNO.

3.2 Diesel-Pkw

Folgende Maßnahmen können an Diesel-Pkw ohne nennenswerte Zusatzkosten ausgeführt werden:

- optimierte Einspritzung -> 3% Potenzial
- optimierte Getriebeauslegung -> 4% Potenzial
- Leichtlaufreifen -> 4% Potenzial
- verbesserte Aerodynamik -> 1% Potenzial

Weitere preiswerte Maßnahmen, die maximal 25 €/t CO₂ Einsparung kosten¹¹, sind:

Leichtlauföle, Reibungsminimierung im Motor, Verbesserung des Wärmemanagements am Motor und die Gewichtsreduktion.

Für die Weiterentwicklung an Diesel-Pkw eröffnen sich weniger preiswerte Möglichkeiten als an Otto-Pkw. Zudem ist hier das Potenzial der Maßnahmen teils deutlich geringer, da z.B. Downsizing in Verbindung mit Aufladung weitgehend realisiert ist. Für die Hybridtechnik ergibt sich im Wesentlichen das gleiche Bild wie bei den Otto-Pkw.

Tabelle 4 zeigt beispielhaft, welche Kosten den Herstellern bei 20 % CO₂-Emissionsminderung an Diesel-Pkw entstehen:

Tabelle 4: Herstellermehrkosten für 20% CO₂-Minderung bei Otto-Pkw

Hubraum	Diesel		
	< 1,4 L	1,4 bis 2,0 L	> 2,0 L
Durchschnittliche CO ₂ -Emissionen, 2006	122 g/km	156 g/km	215 g/km
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch	4,6 Liter/100km	5,9 Liter/100km	8,1 Liter/100km
Herstellereinkaufspreise nach UBA für 20% CO ₂ -Minderung	679 €	845 €	908 €
20% CO ₂ -Emissionsminderung	24 g/km	31 g/km	43 g/km
20% Einsparung	0,9 Liter/100km	1,2 Liter/100km	1,6 Liter/100km
Preis je Liter Kraftstoff vor Steuern 03/08	0,648 €	0,648 €	0,648 €
Preis je Liter Kraftstoff nach Steuern 03/08	1,330 €	1,330 €	1,330 €
Pkw-Lebensdauer gemittelt nach TREMOD	12 Jahre	12 Jahre	12 Jahre
Einsparung Kraftstoff über 12 Jahre	1.197 Liter	2.980 Liter	4.099 Liter
Einsparung CO ₂ über 12 Jahre	3,2 Tonnen	7,9 Tonnen	10,8 Tonnen
Pkw-Fahrleistung/Jahr nach TREMOD	10.800 Km	21.000 Km	21.000 Km
Nutzen Volkswirtschaft	776 €	1.931 €	2.656 €
Nutzen Verbraucher	1.592 €	3.964 €	5.451 €
Kosten Volkswirtschaft	679 €	845 €	908 €
Kosten pro Tonne CO ₂ -Einsparung Volkswirtschaft	215 €/Tonne CO ₂	107 €/Tonne CO ₂	84 €/Tonne CO ₂
Nutzen pro Tonne CO ₂ -Einsparung Volkswirtschaft	245 €/Tonne CO ₂	245 €/Tonne CO ₂	245 €/Tonne CO ₂
Einsparung pro Tonne CO ₂ Volkswirtschaft	-30 €/Tonne CO ₂	-138 €/Tonne CO ₂	-162 €/Tonne CO ₂
Herstellereinkaufspreise nach TNO et al	1.020 €	1.090 €	1.200 €

Eine 20%ige Effizienzsteigerung kostet die Hersteller demnach durchschnittlich 680 bis 900 €.

¹¹ Bezogen auf die Hubraumklasse von 1.400 bis 2.000 cm³.

Der volkswirtschaftliche Nutzen liegt im Beispiel für die Dieselfahrzeuge je nach Hubraumklasse bei 780 bis ca. 2.600 €. Bei volkswirtschaftlichen Kosten von 680 bis ca. 900 € verbleiben per Saldo ca. 100 bis 1.700 €. Der Nutzen für Verbraucherinnen und Verbraucher über ersparte Kraftstoffkosten kann bis über 5.000 € ausmachen.

Die im Vergleich zur UBA-Stellungnahme vom 19.04.2007 höheren Mehrkosten resultieren - wie bei den Otto-Pkw - aus der TNO-Systematik. Zudem ergeben die Potenziale mancher Maßnahmen nun ein leicht verändertes Bild gegenüber der früheren UBA-Stellungnahme.

Im Vergleich betragen die für Diesel-Pkw ermittelten Kosten ca. 67 bis 78 % der Zusatzkosten gemäß TNO.

4 Zusammenfassung und Fazit

Ausgehend von der UBA-Stellungnahme vom 19.04.2007 haben wir die Kosten und Potenziale effizienzverbessernder Techniken an Pkw aktualisiert. Dafür wurde eine umfangreiche Recherche durchgeführt. Die Resultate stellten wir für sechs Pkw-Klassen (Diesel- und Otto-Pkw, jeweils kleine, mittlere und große) in den Anlagen 1 und 2 dar.

Aus den Einzelmaßnahmen bildeten wir alle sinnvollen Maßnahmenpakete mit ihren Kosten und Effizienzpotenzialen, um daraus Kostenkurven gemäß TNO-Systematik abzuleiten (Anlagen 5 bis 10).

Die Kostenkurven sind Polynome dritten Grades und werden durch die Koeffizienten in Tabelle 5 beschrieben. Werden die Koeffizienten in die Polynome eingesetzt, erhält man die Kurven für die Hersteller-Zusatzkosten je Pkw (in €) als Funktion der CO₂-Reduktion (in gCO₂/km).

Tabelle 5: Resultierende Koeffizienten zur Bestimmung der Kostenkurven für die Hersteller-Zusatzkosten

Hubraum	Ottomotor			Dieselmotor		
	a	b	c	a	b	c
<1,4 l	0,001887	0,282310	0	0,004124	1,042238	0
1,4...2 l	0,00138	0,199462	0	0,002541	0,787621	0
>2 l	0,000948	0,124012	0	0,000860	0,455337	0

Die Aussagekraft der Kostenkurven ist jedoch durch die mögliche Kostenbandbreite für eine gegebene Effizienzsteigerung in g/km, d.h. die Breite der Punktwolken in den Anlagen 5 bis 10, zu relativieren. Zudem bewirkt der Gewichtsbezug der zulässigen CO₂-Emissionen im Kommissionsvorschlag, dass gewichtssteigernde Maßnahmen für die Hersteller relativ günstiger und Leichtbaumaßnahmen teurer werden. Das kann zu einer Gewichtszunahme der Neuwagenflotte und zum Verfehlen des europäischen Emissionsziels von 130 gCO₂/km führen.

Preiswerteste Maßnahmen für Otto- wie für Dieselfahrzeuge liegen rechnerisch im Leichtbau und im motorischen Bereich, wobei das motortechnische Potenzial ausgehend vom heutigen Stand bei Dieselfahrzeugen geringer als bei Otto-Pkw ist. Vollhybridisierung ist bei beiden Antriebssystemen relativ teuer.

Beispielhaft sind die Herstellkosten bei 20 % Effizienzsteigerung berechnet. Sie ist bei Otto-Pkw je nach Klasse für durchschnittlich 280 bis 330 € realisierbar, bei Diesel-Pkw für 680 bis 900 €. Die Differenz zu früheren Schätzungen liegt in erster Linie in der für diese Analyse vorgegebenen TNO-Systematik begründet.

Die tatsächlichen Kosten werden jedoch in der Realität niedriger sein als oben angegeben, da das Potential zur Minimierung der Kosten für die individuelle Flotte eines Herstellers und durch die Möglichkeit zur Poolbildung mehrerer Hersteller noch nicht berücksichtigt sind.

5 Quellen

- [1] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, "Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien", Wuppertal 2006, S. 59
- [2] Arbeitsgemeinschaft WI/IFEU/DLR, "Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insb. regenerativ erzeugtem Wasserstoff", 2006, S. 182
- [3] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), CO₂-Minderungen im deutschen Verkehrssektor - eine Zwischenbilanz", Frankfurt a. M., 2007
- [4] Siemens VDO (Internetauftritt), www.siemensvdo.de/products_solutions/cars/powertrain/hybrid/, letzter Zugriff 04.2008
- [5] Volkswagen AG (Internetauftritt), "Techniklexikon", http://www.volkswagen.at/rund_um_vw/innovation/technik_lexikon, letzter Zugriff 04.2008
- [6] Markus Espig: 2. Zwischenbericht: Technische Möglichkeiten zur Reduktion der CO₂-Emissionen am Beispiel Golf 1.4 I TSI, Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika), im Auftrag des UBA, Aachen, 9/2007, S.12 ff.
- [7] Dr. Stefan Wolff et. al.: Die Einführung der Auto Start Stopp Funktion (ASSF) in Volumenmodellen der BMW Group - ein intelligenter Beitrag zu effizienten Dynamik, 7. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil und Motorentechnik, 20.3.2007, Bd.1 , S. 4
- [8] TNO/IEEP/LAT: "Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO₂-Emissions from passenger cars", Delft, 2006, S. 50
- [9] Dr. Wolfgang Steiger et al, "Diesel- oder Ottomotor - Welcher bietet mehr Potential für die Zukunft?", Beitrag beim 4. internationalen Forum für Abgas- und Partikelemissionen, Ludwigsburg 2006
- [10] Oliver Lang, "Downsizing mit variabler Verdichtung - Alternative oder Ergänzung zur Hybridisierung?" Beitrag zur 16. internationalen AVL-Konferenz "Motor & Umwelt", Graz 2004
- [11] US Environmental Protection Agency (EPA), "Interim Report: New Powertrain Technologies and Their Projected Costs", 2005, Seite 17
- [12] Dr.-Ing. Jochen Günnewig: DRIVE ?- The Future of Automotive Power, 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 5. Oktober 2005
- [13] Markus Espig: Getriebeauslegung Golf GT; Simulationsrechnungen zum Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch im Auftrag des UBA, Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika) Aachen, 27.6.2006
- [14] Telefonnotiz vom 10.4.2007 mit Günther Horsak, ZF Friedrichshafen, Leiter Elektronik Elektrische Antriebe; Tel.: (07541) 77-71 74
- [15] Internetauftritt Ritter Fahrzeug-Technik, www.waermespeicher.com, Letzter Zugriff 04/2008
- [16] Frank Kozlowski, "Mild-Hybrid-Antriebe", in Bibliothek der Technik Band 269, Verlag Moderne Industrie, München 2004, Seite 60
- [17] Umweltportal im Internetauftritt der BOSCH AG, http://www.bosch-umwelt.de/up/de/html/467_274.htm, letzter Zugriff 07.04.2007
- [18] Christian Bach (empa), "Alternative Antriebe und Treibstoffe der Zukunft", Beitrag beim Workshop Energieperspektiven Energie und Mobilität – wohin?, Bern, 01.03.2005
- [19] Pressemitteilung der Valeo GmbH "Ford Fiesta Hybrid-Concept-Car mit Valeo's StARs Technologie" vom 24.9.2004, http://www.valeo.de/~upload/presse/500/Valeo_Ford_de.pdf
- [20] Artikel der Autobild Ausgabe 41/2004, "Ford Fiesta auf Sparkurs", www.autobild.de/aktuell/meldungen/artikel.php?artikel_id=7219&artikel_seite=1&A_SESS=02a99a35ce94aa8cae5af254407c9d0f
- [21] Telefonnotiz vom 11.4.2007 mit Dr. Gerald Eifler, elringklinger Motortechnik GmbH, Tel.: (06126) 22-

- [22] Markus Espig: Technische Möglichkeiten zur Reduktion der CO₂-Emissionen am Beispiel Golf 1.4 I TSI, Ergebnisse der Verbrauchsmessungen am ika (Verbrauchseinfluss Wärmespeicher & Schaltanlage) Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika), im Auftrag des UBA, A
- [23] Telefonnotiz vom 10.4.2007 mit Markus Espig, Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika), Tel.: (0241) 80 - 25640
- [24] KBA 2006: Typprüfdaten der neu zugelassenen Pkw in Deutschland 2006, Stand Februar 2008, AP: Frau Hanske: Tel.: (0461) 316-11 33, E-Mail: Susan.Hanske@kba.de
- [25] TREMOD 4.17, Transport Emission Estimation Model des Umweltbundesamtes, Rechenergebnisse, Dessau 2007
- [26] Dr. Christof Tiemann, FEV Motorentechnik GmbH, Aachen: Wälzlagerung im Verbrennungsmotor. Ein effektiver Weg zur Verbrauchsreduktion. In: MTZ (Motorentechnische Zeitschrift) 04/2007
- [27] Oliver Hoffmann, Thyssen Krupp Stahl: Karosserie Leichtbau in Stahl als Beitrag zur Energieeinsparung. Vortrag am 15.04.2005
- [28] C. Penant, ETRTO: Update on energy efficiency improvement through low rolling resistance tyres, Vortrag am 24.10.2006 bei IEA Paris
- [29] Rettet Stahl die CO₂-Bilanz? In: Lightweightdesign 1/08, S. 15 www.lightweight-design.com
- [30] Sustainable Production of emission reduced light weight car concepts. Collaborative Research and Development project, co-funded by the European Commission under the 6th Framework programme http://www.superlightcar.com/public/index.php?option=com_docman&Itemid=50 letzter Zugriff 04/2008
- [31] Knut Habermann, FEV Engine Technology: Demonstrationsfahrzeug mit kontinuierlich variabler Verdichtung (VCR), <http://www.fev.com/content/public/default.aspx?id=740> letzter Zugriff 03/2008
- [32] David Greenwood, Ricardo UK Ltd.: Forschungsfahrzeug Efficient-C als Diesel-Vollhybrid. In: ATZ (Autotechnische Zeitschrift) 09/2007
- [33] Hr. Korte, Mahle Powertrain UK Ltd.: Downsizing Motorenkonzept als Technologieträger. In: MTZ (Motorentechnische Zeitschrift) 11/2007
- [34] Rolf Müller, Fa. Behr: CO₂-Minderung bei einem Turbo-DI-Ottomotor durch optimiertes Thermomanagement. In: MTZ (Motorentechnische Zeitschrift) 01/2008
- [35] Johann Liebl, BMW, In: MTZ (Motorentechnische Zeitschrift) 09/2007
- [36] Dr. Heinz Theuerkauf, Forschungsverbund Fahrzeugsysteme der Uni Kassel: Ein neues Energiemanagement-Konzept für das elektrische Bordnetz. In: ATZ (Autotechnische Zeitschrift) 01/2007
- [37] Carsten Breitfeld, BMW AG: Konzepte für zukünftige Getriebeentwicklungen. In: ATZ (Autotechnische Zeitschrift) 06/2007
- [38] Dr. Alfons Graf, API Infineon Technologies AG: CO₂-Reduktion durch bedarfsgerechte Leistungssteuerung. In: ATZelektronik (Autotechnische Zeitschrift) 01/2008
- [39] Kurt Blumenröder, IAV GmbH: Chancen des Dieselhybrid. In: ATZ (Autotechnische Zeitschrift) 09/2007
- [40] PSA: Diesel engines and HDi engines. http://www.psa-peugeot-citroen.com/en/psa_group/engines_b3.php letzter Zugriff: 04/2008
- [41] Mineralölwirtschaftsverband http://www.mwv.de/cms/front_content.php?idart=3&idcat=13 Seitenaufruf am 11.04.2008
- [42] KBA 2007: Kraftfahrtbundesamt. Statistische Mitteilungen Fahrzeugzulassungen, Neuzulassungen Dezember 2007, S. 20
- [43] Zierock und DLR, 2007: Entwicklung eines gesetzgeberischen Ansatzes für die Begrenzung der spezifischen CO₂-Emissionen von Pkw in der EU. Gutachten im Auftrag des BMU

6 Anlagen

Anlage 1: Maßnahmen zur Minderung der CO₂-Emissionen am Otto-Pkw - Effizienzpotenziale und Herstellungsmehrkosten

	Maßnahme	Literaturangaben zum CO ₂ - Reduktionspotenzial	Angesetztes CO ₂ - Reduktionspotenzial	Literaturangaben zu Kosten in €	Kosten nach Hubraum in € (geschätzt)			Anteil zuzu- rechnender Kosten	Anteilige Kosten nach Hubraum in € (geschätzt)		
					< 1,4 l	1,4 - 2 l	> 2 l	%	< 1,4 l	1,4 - 2 l	> 2 l
Motor	Downsizing mit Aufladung	20-30% [1]; 14-18% [10]; 20%[33]	20%	200 [10]	180	200	220	100%	180	200	220
	Direkteinspritzung	5-20% [1]; 5% [10]; 8%[35]	5%	0	0	0	0	100%	0	0	0
	Abgasrückführung	5% [1]; 5-7% [2]	5%	ca. 10 (UBA)	10	10	10	100%	10	10	10
	Reduzierung der Motor-Reibungsverluste	7-11 % [2]; 3-5% [8]; 5,4% [26]	4,5%	40-60 [8]	30	40	60	100%	30	40	60
	Latentwärmespeicher	5,7% [22]	3%	600-650 f. Kunden[15]	420	440	450	100%	420	440	450
	optimierter Kühlkreislauf	3% [6]; 3% [8]; 6% [21]; 3%[34]; 4%[38]	3%	45 [8]; 55[38]	45	45	45	100%	45	45	45
	variable Verdichtung (VCR)	8-9% [10]; 2-8% [11]; 7% [31]; bis 8%[26]	6,5%	111-261 [11]; 140 [31]	120	150	180	100%	120	150	180
	variable Ventilsteuerung	12% [1]; bis 10%[26]	11%	300 (UBA)	250	300	350	75%	187,5	225	262,5
	Zylinderdeaktivierung	3-6 % [11]; 4% [12]	1% (< 1,4 l) 2,5% (1,4 - 2l) 4% (>2 l)	210-350 [12]; 59 bis 133 [11]	130	150	170	100%	130	150	170
Getriebe	optimierte Getriebeauslegung	1-1,5 % [8]; bis 4% [13]; 3% [44]	4%	0 [44]	0	0	0	100%	0	0	0
	CVT Getriebe	4,4 - 9,2% [2]; 2% [11]; 4-8%[1, S 68]	5%	190-460 [11]	200	250	300	100%	200	250	300
	Doppelkupplungsgetriebe	bis 10% [5]; 4-5% [8]; 4%[37]	5%	600-900 [8];	750	800	850	75%	562,5	600	637,5
Hybrid	Start-Stop-System	max. 6% [4]; ca. 3;5% [7]; 5% [16]	3%	140-240 [12]; 100+300 Batt. [14]	200	250	300	100%	200	250	300
	Mild-Hybrid	15-18% [4]; > 20% [10]	10-15%	1200-2000 [8]; 1000 [23]	800	1000	1200	75%	600	750	900
	Full-Hybrid	30% [1]	Max. 30%	2800-4200 [8]	2500	3200	4000	75%	1875	2400	3000
Sonstiges	Leichtlaufreifen	max. 5% [2]; 3-4%[28]; 4%[44]	4%	0 [44]	0	0	0	100%	0	0	0
	Verbesserte Aerodynamik	1-2% bei 10% Verbesserung des cw-Werts [2]; 1-2% [11]	1%	0	0	0	0	100%	0	0	0
	Leichtlauföle	1% [3]; 1% [11]; 1%[44]	1%	4-6 [11]	6	6	6	100%	6	6	6
	Gewichtsreduktion um 5%	3-4% [11]; 3-4%[29]	3,5%	110-185 [11]; 27[27]	50	80	110	100%	50	80	110
Kombinationen	optimierter Kühlkreislauf + Latentwärmespeicher		4%		465	485	495		465	485	495
	Latentwärmespeicher + Leichtlauföle		3,5%		426	446	456		426	446	456
	optimierter Kühlkreislauf + Latentwärmespeicher + Leichtlauföle		4,5%		471	491	501		471	491	501
	Downsizing, Aufladung + Start-Stopp		22%		380	450	520		380	450	520
	Downsizing, Aufladung + Mild Hybrid		27%		980	1200	1420		780	950	1120
	Downsizing, Aufladung + Vollhybrid		35%		2680	3400	4220		2055	2600	3220

Anlage 2: Maßnahmen zur Minderung der CO₂-Emissionen am Diesel-Pkw - Effizienzpotenziale und Herstellungsmehrkosten

	Maßnahme	Literaturangaben zum CO ₂ - Reduktionspotenzial	Angesetztes CO ₂ - Reduktionspotenzial	Literaturangaben zu Kosten in €	Kosten nach Hubraum in € (geschätzt)			Anteil zuzu- rechnender Kosten	Anteilige Kosten nach Hubraum in € (geschätzt)		
					< 1,4 l	1,4 - 2 l	> 2 l		< 1,4 l	1,4 - 2 l	> 2 l
Motor	optimierter Kühlkreislauf	3% [8]; 6% [21]; 3%[34]; 4%[38]	3%	45 [8]; 55[38]	45	45	45	100%	45	45	45
	optimierte Einspritzung (Piezo-Injektoren)	3% [17]	3%	0	0	0	0	100%	0	0	0
	Reduzierung der Motor-Reibungsverluste	9-14 % [2]; 3-5% [8]; 5,4% [26]	5%	40-60 [8]	30	40	50	100%	30	40	50
	Downsizing	2% [18]; 3-5 % [8]; bis 6% [9]	5%	120-350 [8]	150	200	250	100%	150	200	250
	Latentwärmespeicher	5,7% [23]	3%	600-650 f. Kunden[15]	420	440	450	100%	420	440	450
	Zylinderdeaktivierung	4% [12]	1% (< 1,4 l) 2,5% (1,4 - 2l) 5% (>2 l)	210-350 [12]; 59 - 133 [11]	130	150	170	100%	130	150	170
Getriebe	optimierte Getriebeauslegung	1-1,5 % [8]; bis 4% [13]; 3%[44]	4%	0 [44]	0	0	0	100%	0	0	0
	CVT Getriebe	4,4 - 9,2% [2]; 4-8%[1, S.68]	5%	190-460 [11]	200	250	300	100%	200	250	300
	Doppelkupplungsgetriebe (DSG)	bis 10% [5]; 5% [8]; 4% [9]; 4%[37]	5%	600-900 [8];	600	700	900	75%	450	525	675
Hybrid	Start-Stop-System	5% [9]; 5% [16]	5%	140-240 [12]; 100+300 Batt. [14]	200	250	300	100%	200	250	300
	Mild-Hybrid	6% [20];10% [19]	10-15%	1200-2000 [8]; 1000 [23]	800	1000	1200	75%	600	750	900
	Full-Hybrid	35% [1]	Max. 30%		2500	3200	4000	75%	1875	2400	3000
Sonstiges	Leichtlaufreifen	max. 5% [2]; 3-4%[26]; 4%[44]	4%	0 [44]	0	0	0	100%	0	0	0
	Verbesserte Aerodynamik	1-2% bei 10% Verbesserung des cw-Werts [2]; 1-2% [11]	1%	0	0	0	0	100%	0	0	0
	Leichtlauföle	1% [3]; 1% [11]; 1% [44]	1%	4-6 [11]	6	6	6	100%	6	6	6
	Gewichtsreduktion um 5%	3-4% [11]; 3-4%[29]	3,5%	110-185 [11]; 27[27]	50	80	110	100%	50	80	110
Kombinationen	optimierter Kühlkreislauf + Latentwärmespeicher		4%		465	485	495		465	485	495
	Latentwärmespeicher + Leichtlauföle		3,5%		426	446	456		426	446	456
	optimierter Kühlkreislauf + Latentwärmespeicher + Leichtlauföle		4,5%		471	491	501		471	491	501
	Downsizing, Aufladung + Start-Stopp		7%		350	450	550		350	450	550
	Downsizing, Aufladung + Mild Hybrid		17%		950	1200	1450		750	950	1150
	Downsizing, Aufladung + Vollhybrid		32%		2650	3400	4250		2025	2600	3250

Otto

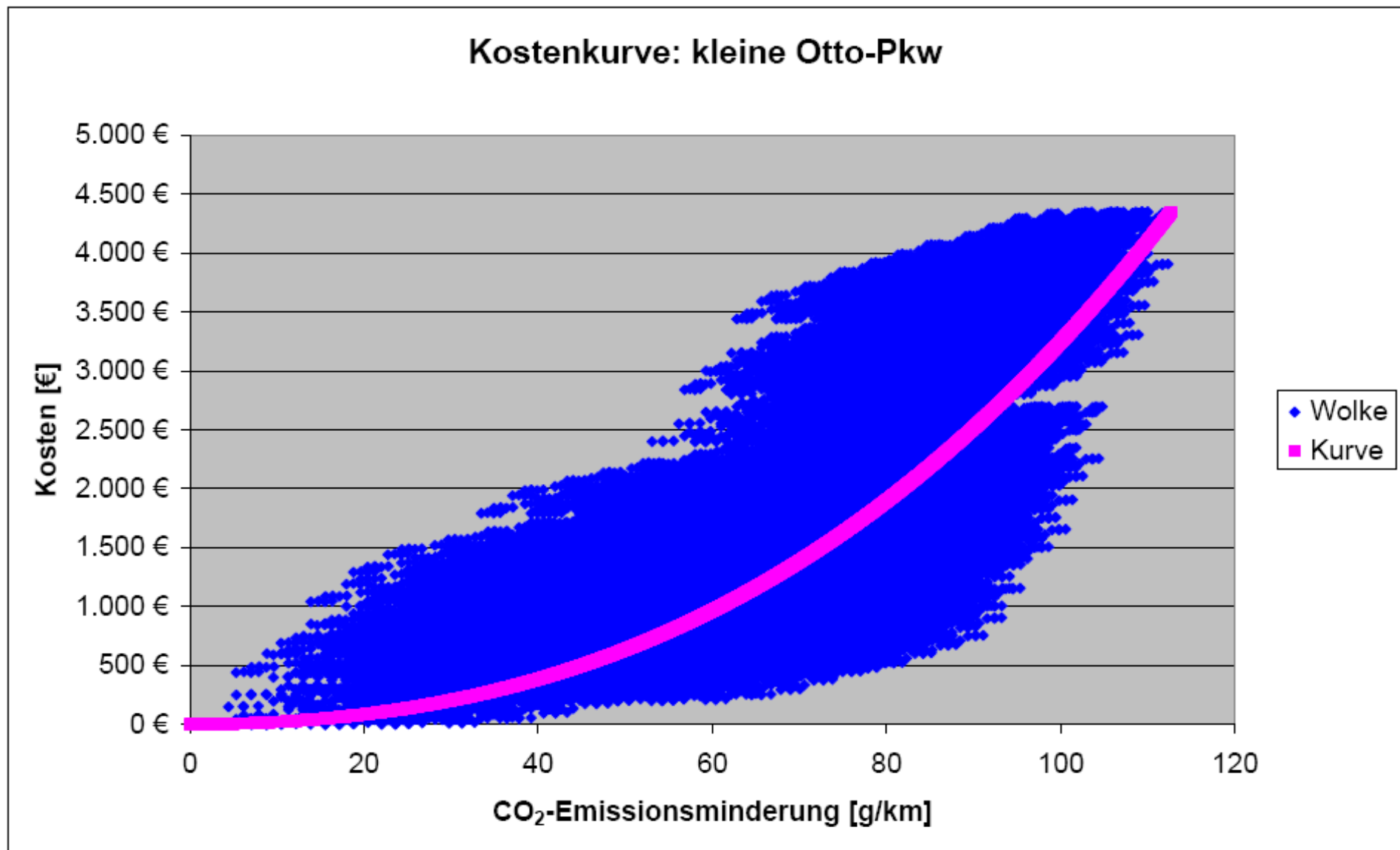
Otto		Motor									Getriebe			Hybrid			sonstiges			
		optimierter Kühlkreislauf	Direkteinspritzung	Reduz. der Motor-Reibverl.	Downsizing	Latentwärmespeicher	Zylinderdeaktivierung	Abgasrückführung	variable Verdichtung (VCR)	variable Ventilsteuerung	optimierte Getrieberegelung	CVT Getriebe	Doppelkupplungsgetr. (DSG)	Start-Stop-System	Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Leichtlaufreifen	Verbesserte Aerodynamic	Leichtlauföle	Gewichtsreduktion um 5%
Motor	optimierter Kühlkreislauf		+	+	+	!	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Direkteinspritzung			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Reduzierung der Motor-Reibungsverluste				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Downsizing					+	+	+	+	+	+	+	+	!	!	!	+	+	+	+
	Latentwärmespeicher						+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	!	+
	Zylinderdeaktivierung							+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Abgasrückführung								+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	variable Verdichtung (VCR)									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Variable Ventilsteuerung										+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Getriebe	optimierte Getrieberegelung										-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	CVT Getriebe											-	+	+	+	+	+	+	+	+
	Doppelkupplungsgetriebe (DSG)												+	+	+	+	+	+	+	+
Hybrid	Start-Stop-System													-	-	-	+	+	+	+
	Mild-Hybrid															-	+	+	+	+
	Full-Hybrid																+	+	+	+
sonstiges	Leichtlaufreifen																	+	+	+
	Verbesserte Aerodynamic																		+	+
	Leichtlauföle																			+
	Gewichtsreduktion um 5%																			

Anlage 3: In Betracht kommende effizienzsteigernde Techniken bei Fahrzeugen mit **Ottomotor**. Verknüpfung der Potenziale bei Bildung von Maßnahmenpaketen. Legende: „+“ Maßnahmen greifen nicht das gleiche Potenzial ab (keine Überlappung; multiplikativ verknüpft); „!“ Maßnahmen greifen das gleiche Potenzial ab (Überlappung; gesonderte Potenzialschätzung); „-“ Maßnahmen schließen sich aus (Pakete gehen nicht in die weitere Berechnung ein).

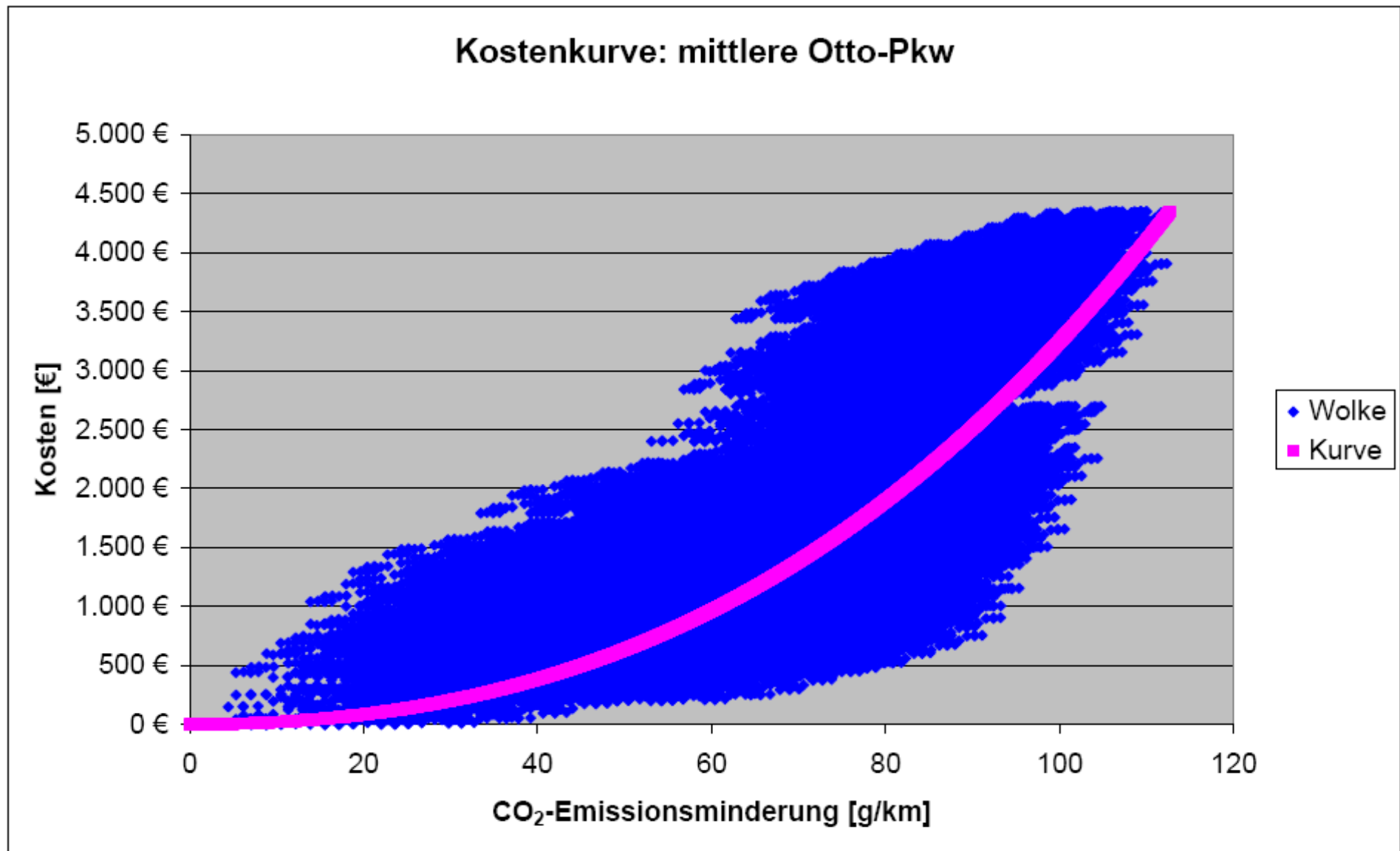
Diesel

		Motor						Getriebe			Hybrid			sonstiges			
		optimierter Kühlkreislauf	Optim. Einspr. (Piezo-Injekt.)	Reduz. der Motor-Reibverl.	Downsizing	Latentwärmespeicher	Zylinderdeaktivierung	optimierte Getrieberegelerung	CVT Getriebe	Doppelkupplungsgetr. (DSG)	Start-Stop-System	Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Leichtlaufreifen	Verbesserte Aerodynamic	Leichtlauföle	Gewichtsreduktion um 5%
Motor	optimierter Kühlkreislauf		+	+	+	!	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Optimierte Einspritzung (Piezo-Injektoren)			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Reduzierung der Motor-Reibungsverluste				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Downsizing					+	+	+	+	+	!	!	!	+	+	+	+
	Latentwärmespeicher						+	+	+	+	+	+	+	+	+	!	+
	Zylinderdeaktivierung							+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Getriebe	optimierte Getrieberegelerung								-	+	+	+	+	+	+	+	+
	CVT Getriebe									-	+	+	+	+	+	+	+
	Doppelkupplungsgetriebe (DSG)										+	+	+	+	+	+	+
Hybrid	Start-Stop-System											-	-	+	+	+	+
	Mild-Hybrid												-	+	+	+	+
	Full-Hybrid													+	+	+	+
sonstiges	Leichtlaufreifen														+	+	+
	Verbesserte Aerodynamic															+	+
	Leichtlauföle																+
	Gewichtsreduktion um 5%																

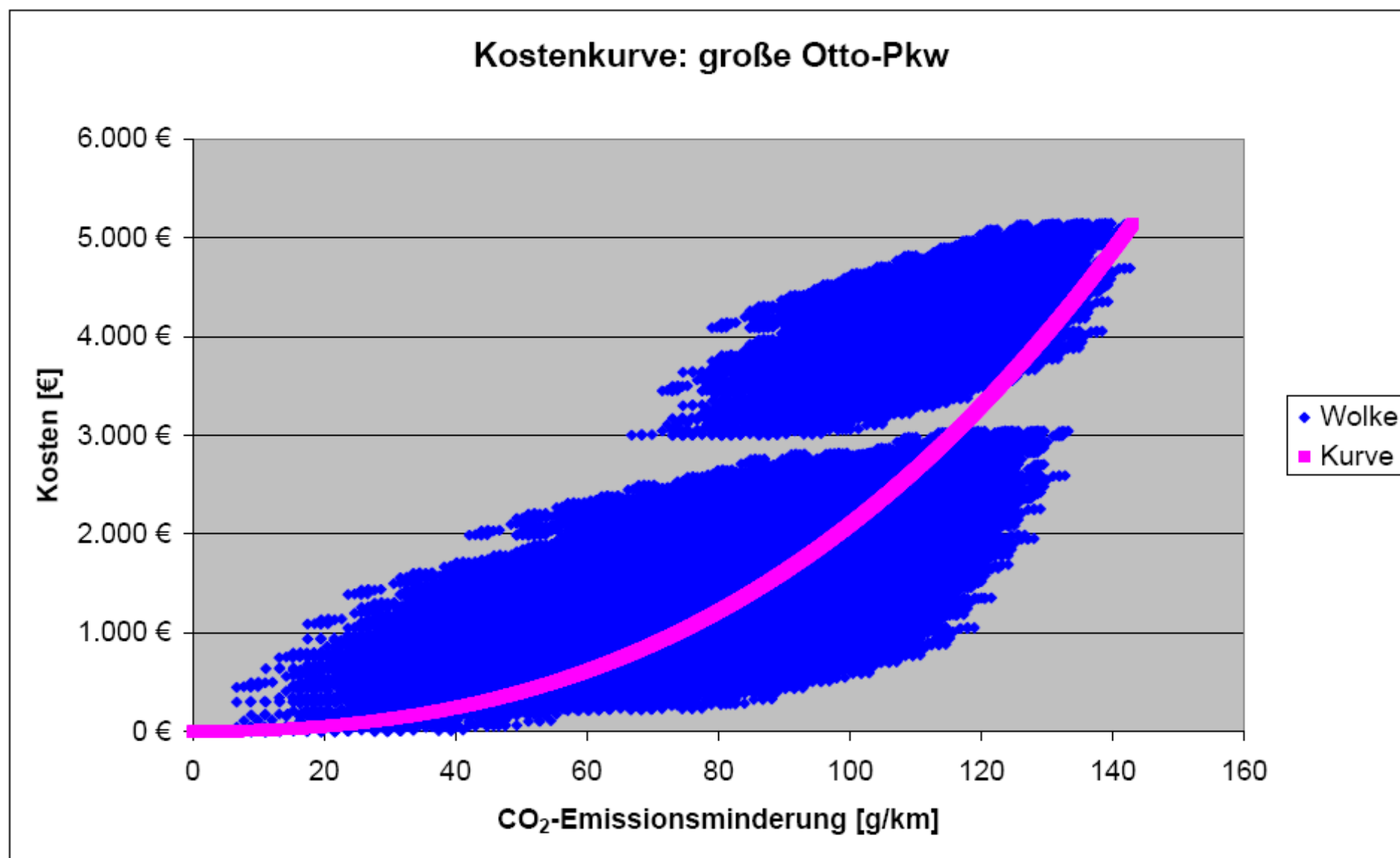
Anlage 4: In Betracht kommende effizienzsteigernde Techniken bei Fahrzeugen mit **Dieselmotor**. Verknüpfung der Potenziale bei Bildung von Maßnahmenpaketen. Legende: „+“ Maßnahmen greifen nicht das gleiche Potenzial ab (keine Überlappung; multiplikativ verknüpft); „!“ Maßnahmen greifen das gleiche Potenzial ab (Überlappung; gesonderte Potenzialschätzung); „-“ Maßnahmen schließen sich aus (Pakete gehen nicht in die weitere Berechnung ein).



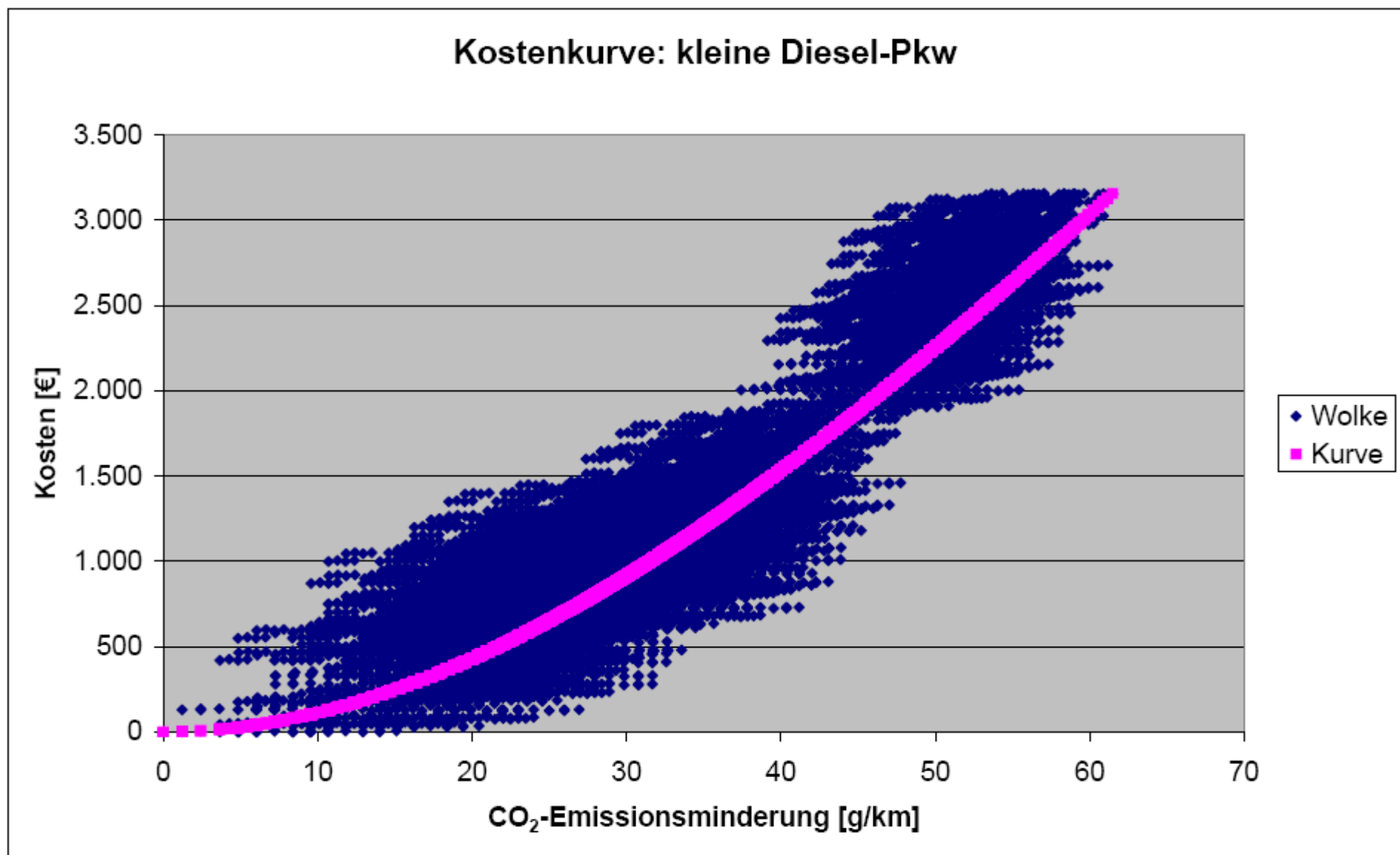
Anlage 5: Potenziale und Herstellerkosten aller Maßnahmenpakete, resultierende Zusatzkostenkurve. Pkw mit **kleinen Ottomotoren (Hubraum < 1,4 Liter)**



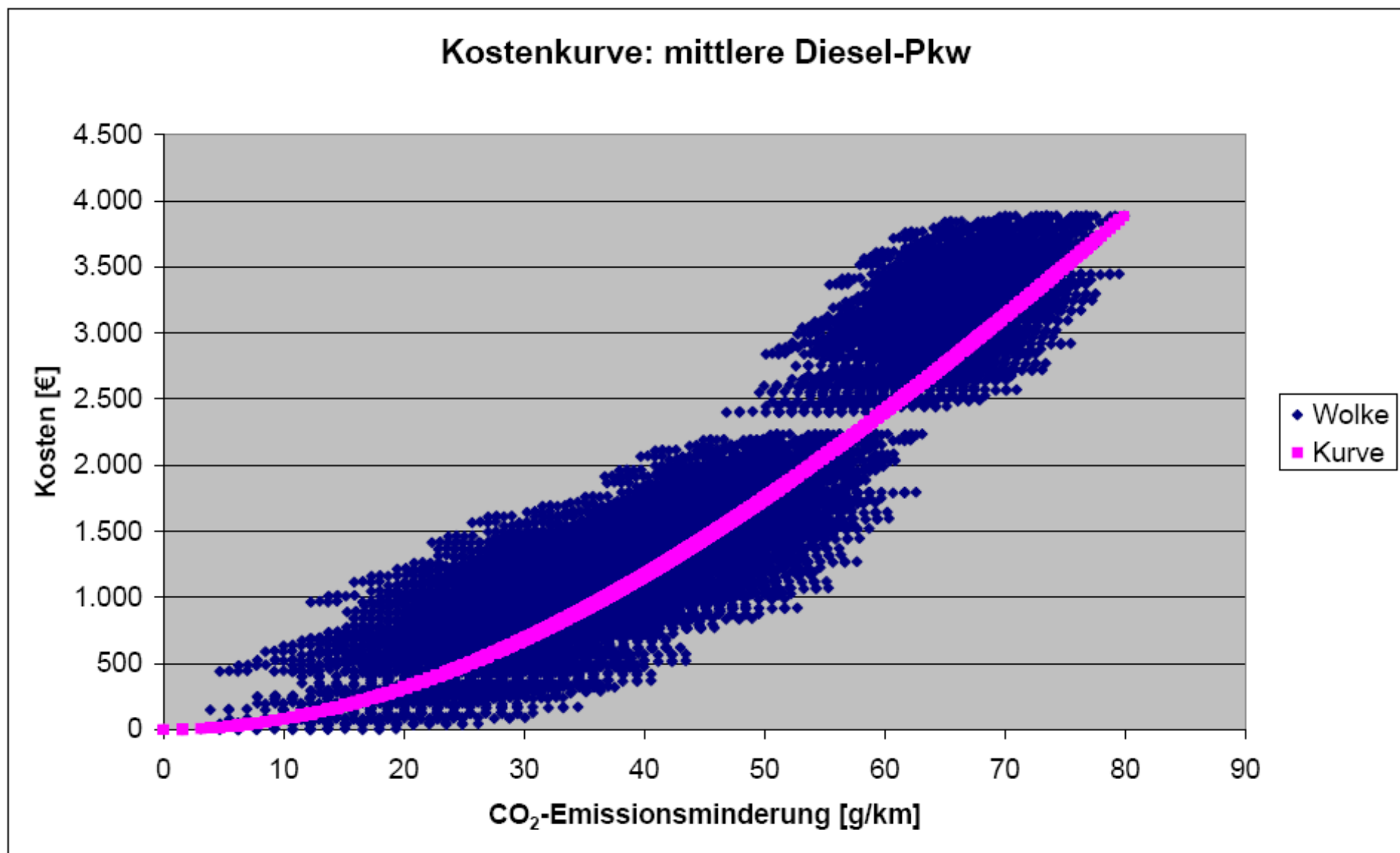
Anlage 6: Potenziale und Herstellerkosten aller Maßnahmenpakete, resultierende Zusatzkostenkurve. Pkw mit **mittl. Ottomotoren (Hubraum 1,4 - 2,0 Liter)**



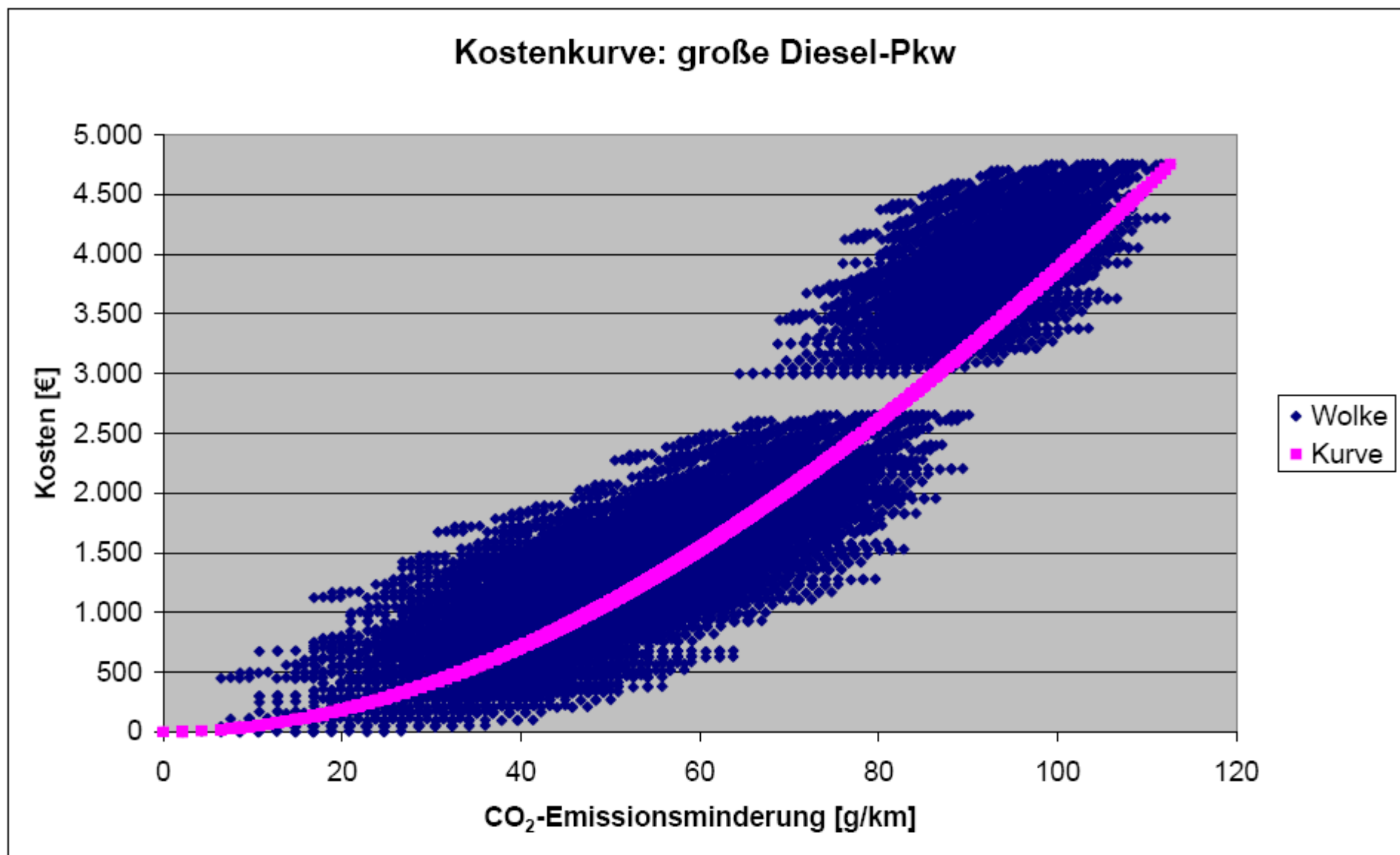
Anlage 7: Potenziale und Herstellkosten aller Maßnahmenpakete, resultierende Zusatzkostenkurve. Pkw mit **großen Ottomotoren (Hubraum > 2 Liter)**



Anlage 8: Potenziale und Herstellerkosten aller Maßnahmenpakete, resultierende Zusatzkostenkurve. Pkw mit **kleinen Dieselmotoren (Hubraum < 1,4 Liter)**

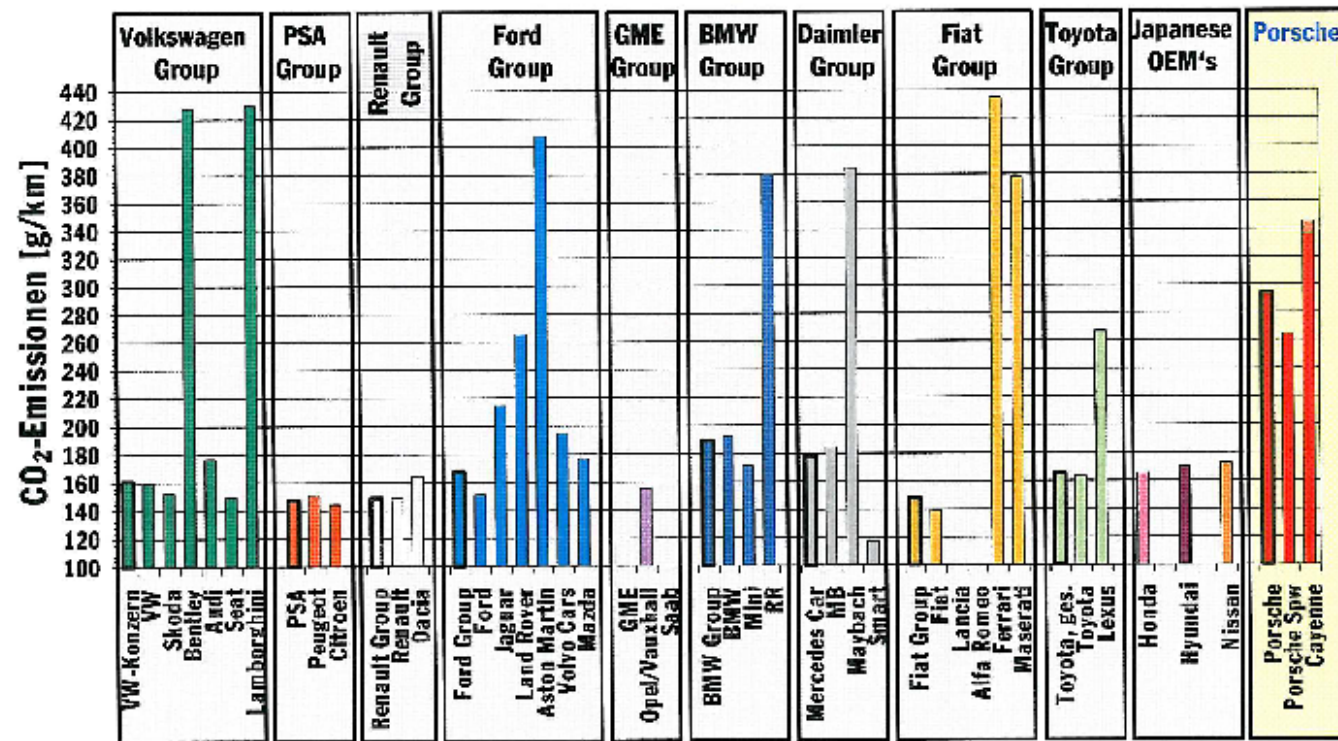


Anlage 9: Potenziale und Herstellerkosten aller Maßnahmenpakete, resultierende Zusatzkostenkurve. Pkw mit **mittl. Dieselmotoren (Hubraum 1,4-2,0 Liter)**



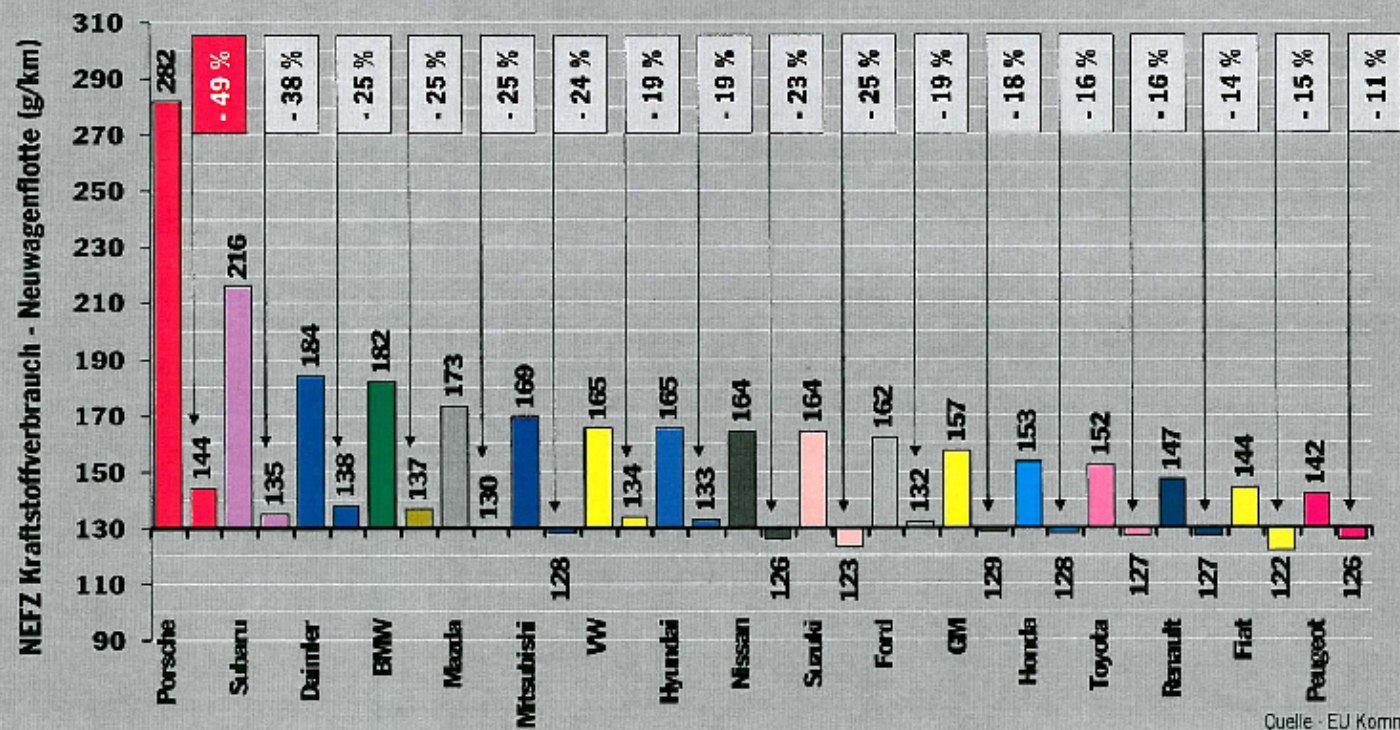
Anlage 10: Potenziale und Herstellerkosten aller Maßnahmenpakete, resultierende Zusatzkostenkurve. Pkw mit **großen Dieselmotoren (Hubraum > 2,0 Liter)**

CO₂ Emissions, Passenger Cars per Group's and Brands



PORSCHE

Hersteller-Neuwagen-Flotten in 2006 / 2012



Quelle: EU Kommission

Anlage 12: Spezifische CO₂-Emissionen je Hersteller 2006, erforderliche Emissionsminderungen bis 2012 in %