

TEXTE

95/2013

# Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen



UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 363 01 425  
UBA-FB 001859

## **Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen**

von

**Julius Jöhrens, Hinrich Helms**  
ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung GmbH

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

**UMWELTBUNDESAMT**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/konzept-zur-zukuenftigen-beurteilung-der-effizienz> verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung  
der Studie: ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung GmbH  
Wilckenstr. 2  
69120 Heidelberg

Abschlussdatum: November 2013

Herausgeber: Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>  
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet I 3.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im  
Verkehr  
Helge Jahn

Dessau-Roßlau, Dezember 2013

## Kurzbeschreibung

Zur Bewertung von Fahrzeugen (z.B. beim Pkw-Effizienzlabel und der Kfz-Steuer) wird heute vor allem deren direkter CO<sub>2</sub>-Ausstoß herangezogen und ab 2015 auch europaweit begrenzt (EU-Flottengrenzwerte). In jüngerer Zeit werden jedoch zunehmend alternative Antriebssysteme erforscht, deren CO<sub>2</sub>-Emissionen teilweise (Plug-In Hybride) oder vollständig (Elektrofahrzeuge) vom Auspuff in die Energiebereitstellung verlagert werden. Eine Bewertung der sogenannten ‚Nullemissionsfahrzeuge‘ auf Basis ihres direkten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ist dann nicht mehr aussagekräftig und auch Mischkonzepte (wie Plug-In Hybride) werden auf dieser Basis nur unzureichend bewertet. Ein Paradigmenwechsel von einer emissionsseitigen (Output-)Bewertung zu einer energieseitigen (Input-)Bewertung ist daher notwendig.

Die bestehenden Regulierungsinstrumente für Kraftfahrzeuge (das sind insbesondere die europäischen CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte sowie die CO<sub>2</sub>-Abhängigkeit der Kfz-Steuer) sollten daher mittelfristig im Sinne einer Effizienzregulierung weiterentwickelt werden. Die Studie diskutiert hierzu die Vor- und Nachteile verschiedener Bewertungsansätze. Ziel ist dabei, dass bei sämtlichen Antrieben vorhandene Effizienzpotentiale bestmöglich genutzt werden.

## Abstract

The environmental assessment of vehicles is currently mostly based on direct CO<sub>2</sub> emissions. Examples are the EU fleet targets, which become mandatory in 2015, but also the vehicle efficiency label and vehicle taxation in Germany. Increasing numbers of alternative propulsion systems - such as plug-in hybrids or electric vehicles - require another method for measuring efficiency, since most of the well-to-wheel emissions occur in the process of energy provision. An evaluation of so-called 'zero emission vehicles' on the basis of their tailpipe emissions is no longer sufficient. Also mixed drive train concepts (such as plug-in hybrids) are not adequately assessed by means of an emission oriented approach. Therefore, a transition from an emission-based (output) assessment to an energy-based (input) assessment is necessary.

Hence, the current regulation schemes for light duty vehicles should be modified in order to be based on vehicle efficiency in the medium term. This study discusses the advantages and disadvantages of various options for a future energy efficiency assessment of vehicles. The goal is to take advantage of existing potentials for efficiency improvement of all available power trains.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungen .....	8
1 Zusammenfassung .....	9
2 Summary.....	10
3 Hintergrund und Zielstellung .....	11
4 Energieeffizienz im Kraftfahrzeug.....	16
4.1 Allgemeines.....	16
4.2 Die Inputseite: Der Energieaufwand.....	17
4.2.1 Energie.....	18
4.2.2 Exergie.....	18
4.3 Die Outputseite: Der Nutzwert des Fahrzeugs.....	18
5 Berechnungsmodelle für die Energieeffizienz.....	20
5.1 Modell 1: Gesamtenergieaufwand ohne Differenzierung der Energieträger.....	20
5.2 Modell 2: Energieträgerspezifischer Referenzverbrauch.....	21
5.3 Vergleich der Effizienzmodelle.....	22
6 Instrumentarium zur Effizienzregulierung .....	24
6.1 Umsetzung der Effizienzbewertung.....	24
6.2 Bestimmung der Referenzwerte .....	25
6.3 Differenzierung des Indikators .....	25
6.4 Die „Regulierungsmatrix“ .....	27
7 Quellenverzeichnis.....	28
Anhang.....	30
A Bisherige Ziele und Instrumente zur THG-Reduktion im Straßenverkehr .....	30
B Beispiele für mögliche Regulierungsmodelle .....	31
B 1 Regulierungsbeispiel 1: Flottengrenzwert für Effizienz .....	31
B 2 Regulierungsbeispiel 2: Flotteneffizienzgrenzwert nach dem Top-Runner-Prinzip.....	32
C Alternatives Modell zur Effizienzbewertung: Differenzierung in Antrieb und Fahrzeug .....	34
C 1 Konzept.....	34
C 2 Berechnungsmethodik.....	34
C 3 Anwendung.....	35

C 4 Anwendungsbeispiel: Differenzierte Verbraucherinformation nach dem Top-Runner-Prinzip .....37

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung der betriebsbedingten Energieverluste eines Fahrzeugs. ....	16
Abbildung 2:	Matrixdarstellung möglicher Regulierungsmechanismen .....	27
Abbildung 3:	Energieverbräuche am Rad für ein Fahrzeug der Golfklasse mit verschiedenen Antrieben (links) sowie verschiedene Fahrzeugklassen mit Verbrennungsmotor (rechts) im Vergleich (Jöhrens and Helms 2012) .....	34



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ziele und Instrumente zur Reduktion der THG-Emissionen im Straßenverkehr .....	13
Tabelle 2:	Heizwerte verschiedener Energieträger.....	18
Tabelle 3:	Beispielfahrzeuge – Kenndaten und Effizienz nach Modell 1 .....	20
Tabelle 4:	Beispielhafte Referenzverbräuche.....	21
Tabelle 5:	Relativer Verbrauch der Beispielfahrzeuge nach Modell 2 .....	22
Tabelle 6:	Ziele und Instrumente zur Reduktion der THG-Emissionen im Straßenverkehr (mit Anmerkungen).....	30
Tabelle 7:	Beispielhafte Referenzwirkungsgrade .....	36
Tabelle 8:	Beispielfahrzeuge – Kenndaten und Effizienz nach den verschiedenen Berechnungsmodellen.....	36
Tabelle 9:	Beispielfahrzeuge – Einordnung in Effizienzklassen nach Modell 3 .....	37

## Abkürzungen

NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
BEV	Battery Electric Vehicle (Batterieelektrisches Fahrzeug)
PHEV	Plug-In Hybrid Vehicle (Plug-In-Hybridfahrzeug)
FCEV	Fuel-Cell-Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
WLTP	Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure (Global abgestimmtes Verfahren zum Testen von leichten Kraftfahrzeugen)
WtT	Well-To-Tank (von der Primärenergieentnahme bis zum Fahrzeug)
TtW	Tank-to-Wheel (vom Energiespeicher im Fahrzeug bis zum gefahrenen Kilometer)
THG	Treibhausgase
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
LNG	Liquid Natural Gas (flüssiges Erdgas)
LPG	Liquid Propane Gas (flüssiges Propangas)
ZEV	Zero Emission Vehicle (Nullemissionsfahrzeug)
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub
VCD	Verkehrsclub Deutschland

## 1 Zusammenfassung

Jahrzehntlang wurden Kraftfahrzeuge fast ausschließlich mit Benzin oder Dieselmotoren aus fossilem Erdöl betrieben, weswegen der Verkehr heute eine Hauptquelle von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist. Zur Bewertung von Fahrzeugen (z.B. beim Pkw-Effizienzlabel und der Kfz-Steuer) wird daher vor allem deren direkter CO<sub>2</sub>-Ausstoß herangezogen und ab 2015 auch europaweit begrenzt (EU-Flottengrenzwerte). In jüngerer Zeit werden jedoch zunehmend alternative Antriebssysteme erforscht und könnten schon bald einen relevanten Marktanteil stellen. Bei der Elektro- und Wasserstoffmobilität werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen dann vollständig vom Auspuff in die Energiebereitstellung verlagert - eine Bewertung dieser sogenannten ‚Nullemissionsfahrzeuge‘ auf Basis ihres direkten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verliert damit ihren Sinn. Auch Mischkonzepte (wie Plug-In Hybride) werden auf dieser Basis nur unzureichend bewertet.

Auch wenn sich die Möglichkeiten für den Einsatz erneuerbarer (und damit nahezu emissionsfreier) Energie mit den neuen Konzepten deutlich erweitert, ist es keineswegs garantiert, dass die Fahrzeuge auch tatsächlich damit betrieben werden. Das hängt sowohl von den politischen Rahmenbedingungen als auch vom Nutzerverhalten ab und kann sich im Verlauf eines Fahrzeuglebens durchaus ändern (z.B. durch Bezug von zertifiziertem Ökostrom). Beim Strom ist eine Zuordnung zu erneuerbaren Quellen darüber hinaus äußerst komplex und in vielen Fällen fragwürdig. Die Bewertung der Kohlenstoffintensität der in Kraftfahrzeugen verwendeten Energieträger muss daher von der Bewertung der Fahrzeuge an sich entkoppelt werden. Bei letzterer ist die Effizienz der Energieumwandlung somit das entscheidende Kriterium. Das heißt: Auf Fahrzeugebene ist ein Paradigmenwechsel von einer emissionsseitigen (Output-)Bewertung zu einer energieseitigen (Input-)Bewertung notwendig.

Der Energieverbrauch eines Fahrzeugs kann durch den thermischen Energiegehalt der ihm zugeführten Energieträger beschrieben werden. Dabei ist es sinnvoll, verschiedene Energieträger anhand spezifischer Referenzwerte zu differenzieren, da die technisch erreichbare Effizienz bei ihrer Umwandlung sehr unterschiedlich ist. Nur so wird bei allen Antrieben ein Anreiz zur Verbesserung geschaffen.

Die bestehenden Regulierungsinstrumente (das sind insbesondere die europäischen CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte sowie die CO<sub>2</sub>-Abhängigkeit der Kfz-Steuer) sollten daher mittelfristig im Sinne einer Effizienzregulierung weiterentwickelt werden. Zur Bestimmung der Grenz- bzw. Referenzwerte bietet sich dabei neben absoluten Vorgaben auch das sogenannte Top-Runner-Prinzip an, bei dem die zu einem Zeitpunkt effizienteste Technologie zum Standard für einen späteren Zeitpunkt erklärt wird.

Wie auch immer eine Effizienzbewertung zukünftig aussehen wird: Eine energiebezogene Bewertung von Fahrzeugen wird gegenüber einer emissionsbezogenen Bewertung zukünftig wichtiger; eine Bewertung von Fahrzeugen anhand des Energieverbrauchs sorgt schließlich auch für mehr ökonomische Transparenz. Während in der Markteinführungsphase eine Bevorzugung alternativer Antriebe noch von geringer Bedeutung sein mag und vielleicht sogar gewünscht ist, müssen langfristig alle Fahrzeuge und Antriebskonzepte ihren Beitrag zur Erreichung der politischen und gesellschaftlichen Ziele leisten. Das Effizienzgebot gilt übrigens auch, wenn erneuerbare Energien eingesetzt werden, denn diese bleiben auf absehbare Zeit ein knappes Gut und dürfen daher nicht verschwendet werden – egal ob in Verbrennungs- oder Elektromotoren.

## 2 Summary

For many decades, motor vehicles have been powered almost exclusively with petrol or diesel fuel, rendering traffic a major source of CO<sub>2</sub> emissions. For evaluation purposes of motor vehicles (e.g. efficiency labelling of passenger cars, car vehicle tax rates), the principal factor under consideration is the direct emission rate of CO<sub>2</sub> per vehicle, which will be restricted across Europe starting in 2015 (EU fleet target). Recently, alternative drive systems have been the subject of intense research, and may soon contribute a relevant share in the market. Vehicle propulsion utilising electric or hydrogen fuel sources shifts CO<sub>2</sub> emissions in their entirety from the exhaust to the energy generation stage. Thus, evaluation of these so-called zero-emissions vehicles on the grounds of their direct CO<sub>2</sub> emissions has little meaning. Evaluation of hybrid vehicles (such as plug-in hybrid cars) under these premises is also not fully appropriate.

Although the novel concepts greatly expand opportunities for the application of renewable (and therefore virtually emission-free) energies, it is not certain whether a relevant number of vehicles employing these techniques will be operated in the future. The outcome may depend on the political framework and the user behaviour, and could potentially change during the course of the vehicle service life (e.g. by utilisation of certified green electricity). Furthermore, an unequivocal and reliable classification of electricity generated from renewable energy sources proves complex and frequently challenging. Thus, the evaluation of the carbon impact of energy carriers utilised in vehicle propulsion should ideally be separated from the evaluation of the vehicles under consideration. The relevant criterion for vehicle assessment would thus be the efficiency of energy conversion. In other words, at the vehicle level, a paradigm shift in evaluation approaches from emission-related output to energy-related input is required.

Vehicle energy consumption may be quantified through consideration of the thermal energy content of the energy carriers utilised. In this process, it may be advisable to differentiate individual energy carriers according to specific reference values, as the potentially attainable technical level of efficiency in energy conversion may greatly differ. Thus, an incentive for improvement is introduced for all types of vehicle propulsion.

In consequence, existing regulatory instruments (i.e. the EU fleet target limits and the dependency of car vehicle taxation of CO<sub>2</sub> emissions) should be developed to reflect the context of efficiency regulation in the midterm. For specification of the limits and reference values, in addition to absolute standards it is recommended to include the so-called top runner principle, which declares the most efficient technology at a given point in time as the future standard.

Whatever form future efficiency evaluations may take—an energy-related evaluation approach of motor vehicles is going to rise in importance compared to emission-related approaches. Moreover, evaluating vehicles based on their energy consumption will promote greater economic transparency. Although a bias towards alternative drive systems may be negligible or even preferable during the introductory stage, in the long term all vehicles and drive systems will have to contribute to the achievement of political and social goals. Incidentally, the efficiency imperative also applies to the utilisation of renewable energies. These clearly remain of limited supply in the foreseeable future and should thus not be squandered—whether as fuels for combustion engines or electric motors.

### 3 Hintergrund und Zielstellung

#### Kraftfahrzeuge verursachen einen relevanten Beitrag zu den Treibhausgasemissionen der EU

Jahrzehntelang wurden Kraftfahrzeuge fast ausschließlich durch Verbrennungsmotoren angetrieben, die mit Kraftstoffen aus fossilen Ressourcen, hauptsächlich Erdöl, betrieben wurden. Der dadurch verursachte Ausstoß von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) trägt maßgeblich zum anthropogenen Treibhauseffekt bei – in Deutschland lag der Beitrag der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs 2008 bei gut 20 % (UBA 2010). Laut aktueller Szenarien könnte der Klimawandel bis zum Ende des 21. Jahrhunderts schlimmstenfalls zu einer durchschnittlichen Erwärmung der Erdoberfläche von mehr als 4°C führen, sofern der CO<sub>2</sub>-Ausstoß nicht massiv gesenkt wird (IPCC 2008). Deutschland konnte seine CO<sub>2</sub>-Emissionen seit 1990 im Durchschnitt zwar leicht senken (UBA 2012), die globalen Emissionen steigen jedoch weiterhin an.

#### Die Vielfalt der Antriebssysteme im Straßenverkehr wird in den kommenden Jahren zunehmen

In den letzten Jahren hat sich allgemein das Bewusstsein um den fortschreitenden Klimawandel und die Endlichkeit der fossilen Ressourcen verstärkt. Damit geht auch die Erkenntnis einher, dass deren Verbrennung auf die eine oder andere Weise teurer werden wird. Dies hat die Erforschung alternativer Antriebskonzepte beflügelt, so dass das Spektrum der verfügbaren Antriebe im Straßenverkehr gewachsen ist (siehe Infokasten).

Dennoch hatten alternative Antriebe (inklusive Hybridfahrzeugen) 2011 nur einen Anteil von etwa 1 % an den gesamten deutschen Kfz-Neuzulassungen von etwa 3,17 Mio. Fahrzeugen (KBA 2011). Gründe dafür sind in erster Linie der relativ hohe Anschaffungspreis (insbesondere von Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen), technische Einschränkungen (insbesondere bei der Reichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen sowie das dünne Tankstellennetz (insbesondere bei Wasserstoff, aber in geringerem Maße auch bei Erdgas).

Der technische Fortschritt bei den elektrischen Antrieben und Speichersystemen hat jedoch in den letzten Jahren Fahrt aufgenommen, vor allem aufgrund staatlicher Förderung und schärferer Emissionsregulierung. Insbesondere die Speicherdichte von Batterien war in der Vergangenheit problematisch, könnte sich aber zukünftig deutlich verbessern. Außerdem wird durch den Einstieg in die Großserienproduktion mit stark sinkenden Preisen gerechnet.

#### Infokasten - Alternative Antriebe

Erdgas (Methan) wird derzeit vorwiegend als CNG („Compressed Natural Gas“) im Pkw- und leichten Nutzfahrzeugbereich sowie bei städtischen Busflotten als Kraftstoff eingesetzt. Erdgas verursacht ähnliche CO<sub>2</sub>-Emissionen wie Diesel, weist aber gleichzeitig auch die Vorteile von Otto-Motoren (geringe Schadstoffemissionen bei weniger aufwändiger Abgasnachbehandlung) auf. Durch steuerliche Förderungen in Form einer reduzierten Energiesteuer bis 2018 und damit niedrigere Kraftstoffkosten gegenüber Benzin und Diesel, hat sich CNG bisher als alternative Antriebsart in Deutschland, aber auch international, etabliert. Im deutschen Fahrzeugmarkt stellt CNG jedoch immer noch eine Nische dar (2012: ca. 75.000 Pkw) – dazu dürfte auch beitragen, dass das Netz der Tankstellen, die Erdgas anbieten, nach wie vor dünn ist.

LPG bezeichnet „Liquefied Petroleum Gas“, das im Wesentlichen aus Propan- und Butangas besteht, welches als Nebenprodukt bei der Erdölraffination oder der Erdgasaufbereitung anfällt. Die physikalischen Eigenschaften von LPG unterscheiden sich (mit Ausnahme einer geringeren Dichte) kaum von Benzin und machen damit den Einsatz in umgebauten Otto-Motoren möglich. Wie Erdgas wird LPG derzeit steuerlich begünstigt, die Umrüstung ist bei LPG-Fahrzeugen jedoch einfacher und kostengünstiger (für ca. 2000-3000 €), daher stellen umgerüsteten Benzin-Pkw auch den Hauptbestand der deutschen

LPG-Fahrzeugflotte dar. Diese macht mit fast 500.000 Fahrzeugen derzeit den größten Anteil alternativer Antrieben in Deutschland aus. Hinsichtlich der Treibhausgas- und Schadstoffemissionen werden LPG ähnliche Vorteile wie CNG zugesprochen, jedoch stehen derzeit noch keine marktreifen Alternativen für eine Bereitstellung von LPG aus erneuerbaren Energien in Aussicht.

Bei Flex-Fuel-Fahrzeugen handelt es sich um Benzinfahrzeuge, deren Antriebsstrang so ausgelegt ist, dass der Kraftstoff beliebige Mengen an Methanol bzw. Ethanol enthalten kann. Diese Fahrzeuge sind in Regionen mit einer hohen Bioethanolproduktion verbreitet, insbesondere in Brasilien, wo rein fossiles Benzin kaum verfügbar ist.

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) werden durch einen oder mehrere Elektromotoren angetrieben, die ihre Energie aus einer Batterie beziehen. Der Antrieb ist sehr effizient, nahezu geräuschlos und liefert ein nahezu konstantes Drehmoment über einen weiten Geschwindigkeitsbereich, weswegen eine Gangschaltung in der Regel nicht notwendig ist. Da die Energiespeicherdichte der Batterie (bezogen auf das Gewicht) typischerweise um zwei Größenordnungen unter derjenigen von Flüssigkraftstoffen liegt, haben BEV nur eine begrenzte Reichweite von typischerweise etwa 150 km und sind vergleichsweise schwer. Die Umweltbilanz von BEV hängt primär von der Erzeugung des getankten Stroms ab, aber auch die Fahrzeugherstellung spielt eine größere Rolle als bei konventionellen Fahrzeugen.

Der Antrieb von Plugin-Hybrid-Elektrofahrzeugen (PHEV) stellt eine Mischform aus herkömmlichem Verbrennungsmotor und Elektroantrieb dar. PHEV haben sowohl eine Batterie als auch einen Tank an Bord; welcher Energiespeicher verwendet wird, hängt von der Fahrsituation und vom Ladezustand der Batterie ab. PHEV können wie BEV eine begrenzte Strecke ohne Einsatz des Verbrennungsmotors zurücklegen. Allerdings ist die Batterie i.d.R. kleiner als bei BEV – unterschreitet diese einen kritischen Ladezustand, übernimmt der Verbrennungsmotor den Antrieb und garantiert eine Reichweite ähnlich der konventioneller Fahrzeuge.

Die Brennstoffzellentechnologie nutzt die Energie von Wasserstoff, der mit Luftsauerstoff zu Wasser reagiert. Dabei wird elektrische Energie frei, die zum Betrieb eines Elektromotors genutzt wird. Der Prozess verursacht weder CO<sub>2</sub>- noch Schadstoffemissionen. Die Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug erfordert jedoch einen vergleichsweise großen und schweren Drucktank; vor allem deswegen sind Brennstoffzellenfahrzeuge („Fuel Cell Electric Vehicles“, FCEV) in der Regel schwerer als konventionelle Fahrzeuge. Zudem muss der Wasserstoff zunächst erzeugt werden, wozu verschiedene Verfahren zur Verfügung stehen (z.B. Kohlevergasung, Erdgasdampfpreformierung oder Elektrolyse von Wasser mit elektrischem Strom). Die CO<sub>2</sub>-Intensität dieser „Vorketten“ unterscheidet sich im Allgemeinen stark.

### **Bei alternativen Antrieben und Kraftstoffen nimmt die Bedeutung der Energiebereitstellung für die gesamten Treibhausgasemissionen zu**

Bei konventionellen Fahrzeugen, die mit fossilen Kraftstoffen betankt werden, entstehen etwa 85 % der gesamten Treibhausgasemissionen bei der Verbrennung der Kraftstoffe im Fahrzeug (Knörr 2012); nur etwa 15 % entfallen auf die Vorkette, also die Ölförderung, Raffinierung und Distribution.

Bei batterie-elektrischen und Brennstoffzellenfahrzeugen entstehen während der Fahrt dagegen keinerlei Treibhausgase (THG). Hier liegen die Umweltwirkungen vollständig in der Vorkette. Oft werden solche Fahrzeuge daher als „Zero-Emission-Vehicles“ (ZEV) bezeichnet, was freilich die Vorkette in der Regel nicht einschließt: Wird beispielsweise ein batterieelektrisches Fahrzeug mit Kohlestrom betrieben, so ist die THG-Bilanz „Well-to-Wheel“, also von der Energieerzeugung bis zum gefahrenen Kilometer, nicht besser als für ein konventionelles Fahrzeug.

Eine besonders wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang das Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV)<sup>1</sup>. Hier hängt das Verhältnis zwischen Auspuff- und Vorkettenemissionen stark vom Anteil rein elektrischen Betriebs und damit vom Nutzungsprofil ab. Aktuelle Szenarien zufolge dürfte der Markt für alternative Antriebe mittelfristig von PHEV dominiert werden (Oeko-Institut 2011).

Doch auch in der Vorkette von Benzin- und Dieselmotoren verändert sich etwas: Laut Prognosen der Internationalen Energieagentur wird sich der Anteil sogenannter unkonventioneller Ölvorkommen an der globalen Ölproduktion bis 2035 auf über 10 % erhöhen (IEA 2010). Bei diesen Vorkommen handelt es sich beispielsweise um Ölschiefer und Teersande, bei denen die THG-Emissionen bei der Rohölgewinnung deutlich höher sind als für konventionelle Rohöl. Bei Biokraftstoffen entstehen ebenfalls höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Vorkette, bedingt durch den Aufwand für Anbau, Düngung und Verarbeitung der Biomasse. Allerdings wird das bei Verbrennung von Biomasse im Fahrzeug entstehende CO<sub>2</sub> beim Wachstum der Energiepflanzen aus der Atmosphäre entnommen, durch den Verbrennungsprozess entstehen also keine zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre.

### Die derzeitige CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung basiert auf den direkten Emissionen der Fahrzeuge

Um die THG-Emissionen des Straßenverkehrs zu senken, wurden sowohl auf nationaler wie auch auf europäischer Ebene verschiedene Ziele und Instrumente beschlossen. Den Instrumenten auf Fahrzeugebene liegen dabei durchweg die CO<sub>2</sub>-Auspuffemissionen zugrunde (EU-Flottengrenzwerte, Pkw-Effizienzlabel und Kfz-Steuer). Diejenigen Maßnahmen, die auf den Energieverbrauch abzielen, geben lediglich ein Gesamtziel für den Verkehrssektor vor. Im Falle des Ziels der Erneuerbare Energien-Richtlinie ist zu erwarten, dass es weitgehend technologie-neutral durch Beimischung von Biokraftstoffen umgesetzt werden kann (Kampman 2012). Die Vorgaben des Energiekonzepts der Bundesregierung sind als politische Absichtserklärungen dagegen nicht verbindlich.

Zusätzlich gibt es diverse Rankings von Nichtregierungsorganisationen, von denen der EcoTest des Allgemeinen Deutschen Automobilclubs (ADAC) und die Auto-Umweltliste des Verkehrsclubs Deutschland (VCD) die bekanntesten sind (Tabelle 1). Diese beziehen zum Teil auch die Energiebereitstellung mit ein, basieren dabei jedoch weiterhin auf den CO<sub>2</sub>-Emissionen und nicht auf dem Energieverbrauch. Die Einbeziehung der Vorketten wirft zudem methodische Probleme auf: so kann sich der Kraftstoff-/Strombezug im Laufe der Zeit ändern, und der Versorgungsmix ist im Allgemeinen regional verschieden.

Tabelle 1: Ziele und Instrumente zur Reduktion der THG-Emissionen im Straßenverkehr

Regulierung	Bereich	Gegenstand der Regulierung / Kennzeichnung	Grenzwert / Klassifizierung
Flottengrenzwerte	EU	CO <sub>2</sub> -Auspuffemissionen	< 130 g/km im Flottendurchschnitt bis 2015 (gewichtabhängig)

<sup>1</sup> Im Rahmen dieses Gutachtens wird nicht zwischen Plug-In-Hybridfahrzeugen (PHEV) und Elektrofahrzeugen mit Range-Extender (RE-EV) differenziert. Bei ersteren kann der Verbrennungsmotor direkt das Fahrzeug antreiben, bei letzteren ist der Verbrennungsmotor kleiner dimensioniert und dient ausschließlich dazu, bei Bedarf die Batterie zu laden.

Erneuerbare-Energien-Richtlinie	EU	Anteil Erneuerbarer Energie am Endenergiebedarf des Verkehrssektors	10 % bis 2020
Pkw-Effizienzlabel	D (staatlich)	CO <sub>2</sub> -Auspuffemissionen	Effizienzklassen A+ bis G (gewichtsabhängig)
CO <sub>2</sub> -abhängige Kfz-Steuer	D (staatlich)	CO <sub>2</sub> -Auspuffemissionen	2 € für jedes zusätzliche g CO <sub>2</sub> pro km ab derzeit 110 g / km
Energiekonzept der Bundesregierung	D (staatlich)	Endenergiebedarf im Verkehr	Reduktion bis 2020 um 10 % und bis 2050 um 40 % (jeweils gegenüber 2005)
EcoTest	D (ADAC)	CO <sub>2</sub> -Emissionen Well-to-Wheel (+ Schadstoffe)	1 bis 5 Sterne
Auto-Umweltliste	D (VCD)	CO <sub>2</sub> -Emissionen Well-to-Wheel (+Schadstoffe + Lärm)	Ranking

### Verschiedene Antriebssysteme werden durch die Regulierung der Auspuffemissionen strukturell ungleich behandelt

Die relevanten Regulierungen blenden durch ihren Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Auspuffemissionen die Vorkette durchweg aus. Alternative Antriebe, bei denen die Emissionen ganz oder teilweise in der Vorkette entstehen, werden so strukturell begünstigt. Im Rahmen der Flottengrenzwerte können solche Fahrzeuge die höheren Emissionen anderer Fahrzeuge in der Neuwagenflotte eines Herstellers kompensieren. Diese Möglichkeit wurde gesetzlich noch dadurch erweitert, dass Fahrzeuge mit niedrigen Emissionen (< 50 g/km) bis 2015 mehrfach für die Berechnung der Flottenemissionen berücksichtigt werden können. Die Anreize zur Optimierung konventioneller Fahrzeuge sinken dadurch tendenziell.

### Langfristig müssen die Effizienzpotentiale aller Antriebe ausgeschöpft werden

Diese Bevorzugung von alternativen Antrieben ist in der gegenwärtigen Markthochlaufphase politisch durchaus gewünscht. Mittelfristig ist jedoch zu befürchten, dass diese Strategie auch bei diesen Antrieben zu einem Mangel an Anreizen führt, die Effizienz zu verbessern. Dies ist aber aus folgenden Gründen geboten:

- Alternative Antriebe werden nicht automatisch mit alternativen Energien betrieben. Mit Kohlestrom betriebene Elektroautos verbessern die THG-Bilanz gegenüber konventionellen Fahrzeugen nicht. Woher die Energie kommt, mit der ein Fahrzeug getankt bzw. geladen wird, hängt dabei nicht nur von den energiepolitischen Rahmenbedingungen (Versorgungsmix) ab, sondern auch vom Nutzerverhalten (bspw. Kauf von Ökostrom).
- Vor allem beim Strom ist eine Zuordnung zu erneuerbaren Quellen äußerst komplex und in vielen Fällen fragwürdig, selbst wenn es sich um zertifizierten Ökostrom handelt.
- Die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien ist zwar nicht durch das natürliche Angebot, aber durch die installierte Kapazität sowie logistische Fragen (Beispiel Transportnetze) begrenzt; das wird sich mittelfristig nicht grundlegend ändern. Demzufolge hat eingesparte erneuerbare Energie im Prinzip das Potential, andernorts konventionelle Energie zu ersetzen und deren CO<sub>2</sub>-Emissionen einzusparen.



### **Mischkonzepte (z.B. Plug-In-Hybride) können mit einer Regulierung der Auspuffemissionen nicht sinnvoll erfasst werden**

Gegenwärtig werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen von PHEV nach einem komplexen Verfahren bestimmt (UNECE 2012), das einen Fahrtbeginn mit vollgeladener Batterie vorsieht. Der erste Teil des Prüfzyklus erfolgt rein elektrisch, sobald der Verbrennungsmotor anspringt, werden noch weitere 20 km gefahren, um die Fahrt zur nächsten Lademöglichkeit zu simulieren. Je größer die Batterie, desto größer die elektrische Reichweite und demzufolge auch der elektrisch gefahrene Anteil im Zyklus, was zu niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zyklus führt. Folgendes wird dabei jedoch nicht berücksichtigt:

- Über die reale Nutzung von PHEV, insbesondere die Aufteilung der Betriebsmodi, liegen nur wenige Informationen vor, da es bislang kaum Fahrzeuge gab. Die Berücksichtigung elektrischer Fahranteile im Prüfzyklus entbehrt somit einer empirischen Grundlage.
- Der bei der Typgenehmigung erhobene Energieverbrauch ist daher wenig aussagekräftig, so dass der Fahrzeugkäufer auch die möglichen Betriebskosten nicht zuverlässig abschätzen kann.

### **Ein Paradigmenwechsel von einer emissionsseitigen (Output-)Regulierung zu einer energieseitigen (Input-)Regulierung ist notwendig und wird in diesem Gutachten untersucht.**

Langfristiges Ziel sollte es sein, die derzeitige emissionsbasierte Fahrzeugregulierung durch eine Regulierung der Energieeffizienz zu ersetzen, die dafür sorgt, dass vorhandene Effizienzpotentiale bei sämtlichen Antriebssystemen genutzt werden. Die Effizienzregulierung sollte daher so weit wie möglich von konkreten Antrieben unabhängig und damit einfach und transparent anzuwenden sein. Überdies sollte sie im Rahmen des etablierten Typgenehmigungsverfahrens umsetzbar sein, sich also auf dort erhobene Fahrzeugparameter stützen.

Das vorliegende Gutachten fokussiert auf die Bestimmung sinnvoller Indikatoren für die Energieeffizienz von Fahrzeugen. Die Frage der Repräsentativität des aktuellen Prüfverfahrens (NEFZ) für die reale Fahrzeugnutzung wird nur am Rande behandelt, da sie bereits seit längerem Gegenstand von Diskussionen ist. Derzeit wird das Verfahren unter Leitung der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (Economic Commission for Europe, UNECE) komplett überarbeitet und eine global abgestimmte Prozedur entwickelt (Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure, WLTP).

## 4 Energieeffizienz im Kraftfahrzeug

Die Energieeffizienz der Nutzung von Kraftfahrzeugen ist das Produkt aus der Effizienz der Vorkette (von der Primärenergie bis zur Bereitstellung der Endenergie, „Well-to-tank“) und der Effizienz des eigentlichen Fahrzeuges („Tank-to-Wheel“). Im vorliegenden Gutachten wird ausschließlich letztere betrachtet. Sie hängt sowohl von der Effizienz des Antriebs als auch von Fahrzeuggröße, -form, -masse und weiteren Fahrzeugparametern ab. Bezugsgrößen sind dabei der physikalische Energieinhalt der getankten Energieträger auf der Inputseite und der gefahrene Kilometer auf der Outputseite.

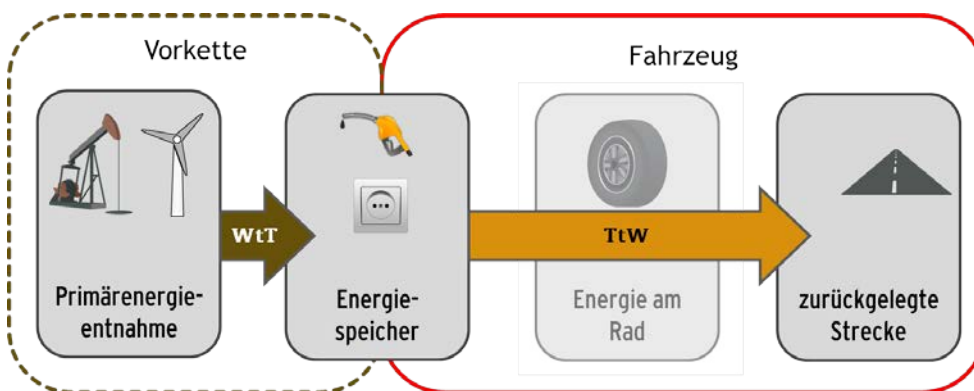
### 4.1 Allgemeines

Energieeffizienz bezeichnet das Verhältnis zwischen dem Nutzwert eines Systems und der Energie, die in dieses System hineingesteckt werden muss. Die Differenz zwischen Nutzenergie und Eingangsenergie stellt die Verlustenergien des betrachteten Systems dar.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der betriebsbedingten Energieverluste eines Fahrzeugs.

WtT: von der Primärenergieentnahme bis zum Fahrzeug (Wheel-to-Tank)

TtW: vom Energiespeicher im Fahrzeug bis zum gefahrenen Kilometer (Tank-to-Wheel)



Die für die Fortbewegung eines Kraftfahrzeugs notwendige Energie wird zunächst stets auf die eine oder andere Weise der Umwelt entnommen, die notwendige Energieentnahme wird als Primärenergieaufwand bezeichnet. Dies kann z.B. durch die Förderung von Rohöl oder anderen fossilen Rohstoffen, aber auch durch die Nutzung der Bewegungsenergie des Windes in einer Windturbine geschehen.

Im nächsten Schritt wird die entnommene Primärenergie in eine Form gebracht, die im Fahrzeug gespeichert werden kann. Das Rohöl wird bspw. zu Benzin oder Diesel raffiniert, die Windenergie in elektrischen Strom (zur Speicherung in einer Batterie) oder gleich in Wasserstoff umgewandelt, mit dem Brennstoffzellenfahrzeuge betankt werden können. Diese Umwandlung ist mit Verlusten behaftet, ihr energetischer Wirkungsgrad wird als Well-to-Tank-Effizienz (WtT) bezeichnet.

Ist die Energie einmal im Fahrzeug, muss sie zum Betrieb des Fahrzeugs zunächst in Bewegungsenergie am Rad umgesetzt werden, was mit Energieverlusten im Antriebsstrang (bspw. Motor und Getriebe) einhergeht. Für die Fortbewegung des Fahrzeugs müssen zudem Fahrwiderstände überwunden werden, die im Wesentlichen aus dem Luftwiderstand, dem Rollwiderstand der Reifen und der Massenträgheit des Fahrzeugs bestehen. Bei Steigungen ist zusätzlich noch die Erdanziehungskraft zu überwinden. Der Wirkungsgrad, mit dem die getankte Energie

in gefahrene Kilometer umgesetzt wird, ist als Tank-to-Wheel-Effizienz (TtW) bekannt. Die TtW-Effizienz hängt damit sowohl von der Effizienz des Fahrzeugantriebs als auch vom Gewicht, der äußeren Form (→ Aerodynamik) sowie weiteren Parametern ab, z.B. vom Reifenmaterial.

Effektive Klimaschutzstrategien müssen stets drei Handlungsfelder berücksichtigen: Reduktion des Endenergieverbrauchs, Erhöhung der Umwandlungseffizienz von Primär- zu Endenergie sowie Erhöhung des Anteils erneuerbarer Primärenergie. Dieses Gutachten fokussiert auf Möglichkeiten der fahrzeugbezogenen Effizienzregulierung, es wird also das erstgenannte Handlungsfeld (Tank-to-Wheel-Effizienz) adressiert.

Eine Einbeziehung der WtT-Effizienz in eine fahrzeugbezogene Effizienzregulierung wirft hingegen verschiedene methodische Probleme auf:

- Der konkrete Upstream-Pfad hängt vom Nutzerverhalten ab (z.B. welchen Biokraftstoffanteil der Nutzer tankt). Er kann sich auch als Folge politischer oder ökonomischer Rahmenbedingungen im Laufe der Zeit ändern.
- Die Primärenergie teilt sich in erneuerbare und nicht-erneuerbare auf. Letzterer lässt sich im Verkehrsbereich relativ eindeutig als Heizwert der geförderten fossilen Ressourcen bestimmen. Bei erneuerbarer Energie existieren jedoch verschiedene konkurrierende Definitionen. Zudem stellt sich die Frage, welche Bedeutung erneuerbarer Primärenergie als Schutzgut im Vergleich mit nicht-erneuerbarer überhaupt zukommt. So sind einige Formen erneuerbarer Energie (z.B. Windkraft) nahezu unbegrenzt verfügbar. Andererseits sind mit der Gewinnung anderer Formen auch komplexe Nebenwirkungen verbunden, wie z.B. Schäden durch Landnutzungsänderung bei Biomassenutzung.
- Zukünftig könnte Power-to-Gas bei der Energiebereitstellung eine wichtige Rolle spielen. Hierbei wird Strom verwendet, um mittels Elektrolyse Wasserstoff herzustellen. Dieser kann entweder direkt als Energieträger verwendet werden oder durch Reaktion mit CO<sub>2</sub> zu synthetischem Erdgas umgewandelt werden (Synthetic Natural Gas, SNG). Wird der Wasserstoff zur Synthese von Flüssigkraftstoffen verwendet, so spricht man von Power-to-Liquid. Die zusätzlichen Umwandlungsschritte sind mit erheblichen Energieverlusten verbunden, allerdings kann der zeitlich flexible Energiebedarf von Power-to-Gas helfen, die fluktuierende Erzeugung erneuerbarer Energien auszugleichen. Dies könnte einen Beitrag dazu leisten, langfristig die Sicherheit des Stromnetzes zu erhöhen und zukünftig hohe Anteile erneuerbarer Energie zu ermöglichen. Dies muss bei einer Bewertung der WtT-Effizienz dieser Pfade berücksichtigt werden.

Die Energiebereitstellung wird für Bewertung der Fahrzeugeffizienz daher nicht berücksichtigt. Die Notwendigkeit einer möglichst effizienten und CO<sub>2</sub>-armen Energiebereitstellung bleibt davon unberührt und sollte durch geeignete (regulative) Maßnahmen außerhalb der Fahrzeugregulierung sichergestellt werden.

## 4.2 Die Inputseite: Der Energieaufwand

Mit wachsender Vielfalt der Antriebssysteme wächst auch die Vielfalt der in Kraftfahrzeugen genutzten Energieträger (siehe Infokasten zu alternativen Antrieben, S. 11). Teilweise können mehrere Energieträger zugleich bzw. alternativ im selben Fahrzeug benutzt werden: Plug-In-Hybridfahrzeuge haben einen Verbrennungs- und einen Elektromotor und können dabei auch mit Strom aus dem Netz betankt werden. Flex-Fuel-Fahrzeuge können mit beliebigen Mischungsverhältnissen von fossilen und Biokraftstoffen betrieben werden. Um die Gesamteffizienz solcher Fahrzeuge zu vergleichen, muss der Energiegehalt aller Energieträger, mit denen das Fahrzeug betankt wird, berücksichtigt werden.

### 4.2.1 Energie

Für den physikalischen Energiegehalt eines Stoffes gibt es verschiedene Definitionsmöglichkeiten. Für die Energieumwandlung im Fahrzeug sind bei Verbrennungsmotoren die Gesetze der Thermodynamik maßgeblich, so dass im Folgenden der thermische Energiegehalt zugrunde gelegt wird. Hier kann entweder der obere Heizwert (auch „Brennwert“ genannt) oder der untere Heizwert verwendet werden; beide unterscheiden sich z.T. deutlich (siehe Tabelle 2). Der untere Heizwert eines Stoffes bezeichnet die Wärmemenge, die bei seiner Verbrennung unmittelbar frei wird. Der Brennwert dagegen enthält zusätzlich noch die Energie, die bei der Kondensation der heißen Verbrennungsgase frei wird. In modernen Heizungen im Gebäudebereich wird diese Kondensationswärme bereits routinemäßig ausgenutzt. Im Fahrzeugbereich ist dies hingegen noch nicht üblich. Die Wahl von Heizwert oder Brennwert als Bezugsgröße muss im Zuge einer konkreten Effizienzgesetzgebung getroffen werden.

Für Elektroenergie ist diese Unterscheidung irrelevant, da sie ohne den Umweg über die Wärme direkt in mechanische Energie umgesetzt werden kann. Elektrische Energie ist daher in gewissem Sinne „höherwertig“.

Tabelle 2: Heizwerte verschiedener Energieträger

Energieträger	unterer Heizwert [MJ / kg]	oberer Heizwert [MJ / kg]
Benzin	42,9	46,5
Diesel	42,7	45,4
Erdgas (H)	47,3	52,3
Propan	46,4	50,3
Wasserstoff	120	142

Daten nach (Universität Magdeburg 2012)

### 4.2.2 Exergie

Der Wirkungsgrad für die Umwandlung von thermischer in mechanische Energie ist durch grundlegende physikalische Gesetze begrenzt. Der mechanisch nutzbare Teil thermischer Energie wird als Exergie bezeichnet, der Rest als Anergie (diese entspricht der Abwärme). Für eine Effizienzbetrachtung konkreter Antriebe wäre es an sich wünschenswert, nur diejenige Energie als Eingangsgröße zugrunde zu legen, die nach den Gesetzen der Physik potentiell in Bewegungsenergie umgewandelt werden könnte, also die Exergie.

Dies ist jedoch schwierig, da das Verhältnis zwischen Exergie und Anergie von der Temperatur des Verbrennungsprozesses abhängt: Je höher die Temperatur, desto höher der Wirkungsgrad. Die Verbrennungstemperatur kann als technische Variable aber nicht Grundlage eines technologieneutralen Bewertungssystems sein. Der exergetische Ansatz kommt somit für eine Effizienzbewertung von Fahrzeugen nicht in Frage.

## 4.3 Die Outputseite: Der Nutzwert des Fahrzeugs

Der primäre Nutzen eines Kraftfahrzeugs ist der Transport von Insassen und Fracht über eine bestimmte Strecke. Daher sind die bisher angewandten Emissionsgrenzwerte bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen für Schadstoffe und CO<sub>2</sub> stets auf einen Fahrzeugkilometer bezogen. Bei den CO<sub>2</sub>-Grenzwerten ist zusätzlich ein Gewichtsbezug enthalten, der die Unterschiede im

Energieverbrauch berücksichtigen soll, die aus unterschiedlicher Fahrzeuggröße und Ausstattung resultieren.

Alternative Parameter zur Berücksichtigung der Größe oder des Nutzwertes von Fahrzeugen wären beispielsweise das Volumen, die Platzanzahl oder die Grundfläche bzw. die Fläche zwischen den Achsen („footprint“). Diese Parameter wurden im Rahmen des Gesetzgebungsprozesses für die CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwerte umfangreich diskutiert (siehe z.B. (Herbener and Jahn 2006)). Die Frage der Bezugsgröße ist zwar äußerst wichtig, aber nicht Gegenstand dieses Gutachtens. Bei den weiteren Betrachtungen wird daher im Sinne der Verständlichkeit ausschließlich die gefahrene Strecke als Bezug verwendet. Alle Ausführungen lassen sich aber problemlos verallgemeinern, indem man eine andere Nutzeinheit einsetzt.

## 5 Berechnungsmodelle für die Energieeffizienz

Es werden zwei Modelle zur Berechnung der Fahrzeugeffizienz vorgeschlagen. Modell 1 legt den gesamten Energiegehalt der getankten Energieträger zugrunde, ohne zwischen verschiedenen Energieträgern zu differenzieren. Modell 2 führt für jeden Energieträger eine individuelle Bezugsgröße ein, um die unterschiedlichen technischen Potentiale bei der Steigerung der Umwandlungseffizienz zu berücksichtigen. Modell 2 ist zwar komplexer, eröffnet aber deutlich mehr Flexibilität bei der Gesetzgebung.

Im Folgenden werden zwei konkrete Berechnungsmodelle für die Energieeffizienz von Fahrzeugen gegenübergestellt. Im Anhang ist ein weiteres Modell beschrieben; dieses ist allerdings primär zur Verbraucherinformation geeignet und schlecht im Rahmen einer Grenzwertgesetzgebung anwendbar.

Für die Effizienzbewertung hat sich in Deutschland die Angabe des Energieverbrauchs (z.B. l/100km) – also des Kehrwertes der Effizienz - durchgesetzt<sup>2</sup>; niedrige Verbräuche bedeuten dabei hohe Effizienz. Die Grundlage der Verbrauchsbewertung wird in den folgenden Betrachtungen aufgrund der besseren Lesbarkeit für den deutschen Konsumenten übernommen. Baut man eine Effizienzregulierung auf diesem Schema auf, geht es demzufolge darum, Grenzwerte für den Verbrauch festzusetzen. Prinzipiell können alle folgenden Betrachtungen durch Kehrwertbildung aber auch für eine „echte“ Effizienzbewertung adaptiert werden.

### 5.1 Modell 1: Gesamtenergieaufwand ohne Differenzierung der Energieträger

Die einfachste Methode zur Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs besteht darin, den summierten Energiegehalt aller Energieträger zugrunde zu legen, die in das Fahrzeug hineingehen, und diesen auf die zurückgelegte Strecke zu beziehen:

$$\text{spezifischer Energieaufwand} = \text{Energieaufwand pro Strecke [kWh / km]}$$

Bei einem Plug-In-Hybridfahrzeug ist der Energieaufwand z.B. die Summe aus dem thermischen Energiegehalt des getankten Kraftstoffs (in kWh) und der geladenen Elektroenergie.

Zur Veranschaulichung betrachten wir beispielhaft drei Fahrzeuge der Kompaktklasse (EU-Fahrzeugklasse C), die sich lediglich im Antriebsstrang unterscheiden (Tabelle 3). Die Fahrzeuggewichte basieren auf (Helms et al. 2011), die Verbrauchsangaben sind an derzeitige Verbräuche im *Neuen Europäischen Fahrzyklus* (NEFZ) angelehnt.

Tabelle 3: Beispielfahrzeuge - Kenndaten und Effizienz nach Modell 1

Antriebsstrang	Masse	Verbrauch	spez. Verbrauch [kWh / km]
Konventionell (Diesel)	1200 kg	Diesel: 4,4 / 100 km	0,439
Plug-In-Hybrid (Benziner)	1480 kg		
autark		Benzin: 5,1 Liter / 100 km	0,452
hybridisch		Benzin: 1,8 Liter / 100 km Strom: 10,6 kWh / 100 km	0,265
rein elektrisch		Strom: 16,5 kWh / 100 km	0,165

<sup>2</sup> Im Gegensatz zu den USA wo die Effizienzangabe als Miles-per-Gallon (mpg) üblich ist.

Brennstoffzelle	1370 kg	H2: 1 kg / 100 km	0,329
-----------------	---------	-------------------	-------

Aufgrund der großen Unterschiede in der Umwandlungseffizienz werden die Ergebnisse vom Antriebssystem dominiert, während die Gewichtsunterschiede in den Hintergrund treten. Die Umwandlungseffizienz liegt im Beispiel bei etwa 25 % für den verbrennungsmotorischen, 73 % für den batterieelektrischen sowie 38 % für den Antriebsstrang mit Brennstoffzelle (jeweils vom Energiespeicher bis zur Energie am Rad). Das batterieelektrische Fahrzeug hat daher trotz des höchsten Gewichts den niedrigsten spezifischen Energieverbrauch und damit die höchste Effizienz.

Der Vorteil dieses Ansatzes besteht in seiner Einfachheit; Anwendung findet er beim US-amerikanischen Fuel Economy Label<sup>3</sup> (EPA 2012a). Dagegen stehen jedoch zwei Nachteile:

- Der Ansatz eignet sich vor allem für die Bewertung von Fahrzeugen mit gleichen Antriebssystemen, während Effizienzverbesserungen eines Antriebssystems (von i.d.R. wenigen Prozent) gegenüber den konzeptspezifischen Unterschieden zwischen den Antrieben kaum ins Gewicht fallen. Die Aussage des Indikators bei einem Vergleich verschiedener Antriebssysteme beschränkt sich daher auf die triviale Tatsache, dass z.B. der batterieelektrische Antriebsstrang eine höhere Umwandlungseffizienz aufweist als die anderen Antriebskonzepte.
- Die Bewertung von Plug-In-Hybridfahrzeugen hängt weiterhin entscheidend davon ab, in welchem Betriebsmodus das Fahrzeug den Test absolviert; eine allgemeingültige Bewertung dieser Fahrzeuge ist auf diese Weise also nicht möglich.

Um in einer Fahrzeugregulierung eine Verbesserung bei sämtlichen Antrieben anzureizen, müssen unterschiedliche Verbrauchsgrenzwerte für die Antriebssysteme festgelegt werden, die die konzeptspezifischen Möglichkeiten berücksichtigen.

## 5.2 Modell 2: Energieträgerspezifischer Referenzverbrauch

Um die genannten Nachteile eines undifferenzierten Energieaufwands zu umgehen, kann man für jeden Energieträger K einen bestimmten spezifischen Referenzverbrauch  $G_K$  einführen, der die technischen Potentiale für die Umwandlung in mechanische Energie widerspiegelt. Durch diesen muss der gemessene Verbrauch  $V_K$  geteilt werden; so erhält man einen „relativen“ Verbrauch  $V^{rel}$ . Für PHEV sieht die Formel dann z.B. folgendermaßen aus:

$$relativer\ Verbrauch = \frac{Benzinverbrauch}{Benzin-Referenzwert} + \frac{Stromverbrauch}{Strom-Referenzwert} \quad (\text{bzw. allgemein } V^{rel} = \sum_K \frac{V_K}{G_K})$$

Solange der Verbrauch im Mittel geringer als der entsprechende Referenzverbrauch ist, bleibt der relative Verbrauch kleiner als 1.

Tabelle 4: Beispielhafte Referenzverbräuche

Energieträger	Referenzverbrauch ( $G_K$ ) [kWh / km]	entspricht
konventionelle Kraftstoffe (Otto, Diesel)	0,36	4,2 Liter Benzin bzw. 3,8 Liter Diesel / 100 km

<sup>3</sup> Dieses basiert auf der Angabe von Benzin-Äquivalenten

elektrischer Strom	0,16	0,16 kWh / 100 km
Wasserstoff	0,28	0,85 kg H <sub>2</sub> / 100 km

Zur Anwendung auf die Beispielfahrzeuge werden in Tabelle 4 beispielhafte Referenzverbräuche für die einzelnen Energieträger definiert, die sich an den effizientesten derzeit am Markt erhältlichen Antriebstechnologien orientieren. Weitere Ansätze zur Ermittlung dieser Referenzwerte werden im folgenden Kapitel diskutiert.

Berechnet man auf dieser Grundlage die Effizienz der Beispielfahrzeuge (Tabelle 5), so zeigt sich, dass diese durch den Bezug auf die technischen Potentiale der Energieträger näher zusammenrücken: Der relative Verbrauch stellt nun dar, wie gut die Effizienzpotenziale (in Gestalt der Referenzverbräuche  $G_K$ ) ausgeschöpft wurden. Dadurch wird automatisch auch das Problem bei der Effizienzbestimmung des Plug-In-Hybrid-Antriebs entschärft: Die Wahl des Betriebsmodus spielt jetzt nur noch insoweit eine Rolle, wie sich die Betriebsmodi in der Umsetzung des Effizienzziels für die verschiedenen Energieträger unterscheiden. Darüber hinaus kommen hier die Effizienzsteigerungen durch eine intelligente Betriebsstrategie bei Hybridfahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen ohne Hybridisierung voll zum Tragen.

Tabelle 5: Relativer Verbrauch der Beispielfahrzeuge nach Modell 2

Antriebsstrang	relativer Verbrauch ( $V^{rel}$ ) *
Konventionell (Diesel)	1,22
Plug-In-Hybrid (Benziner)	
autark	1,27
hybridisch	1,11
rein elektrisch	1,03
Brennstoffzelle	1,18
* < 1: Fahrzeug hat einen geringeren Verbrauch als Referenzfahrzeug. > 1: Fahrzeug hat einen höheren Verbrauch als das Referenzfahrzeug.	

### 5.3 Vergleich der Effizienzmodelle

Der Vergleich des Verbrauchs der verschiedenen Antriebe stellt sich in den beiden Berechnungsmodellen sehr unterschiedlich dar. Die relativen Verbräuche nach Modell 2 sind auf die technischen Möglichkeiten bei der Umwandlung der jeweiligen Energieträger bezogen und liegen dadurch vergleichsweise nahe beieinander; dadurch ist zum ersten Mal eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Antriebstypen möglich. Die dimensionslose Kennzahl mit ihrer Normierung auf 1 als Grenzwert hat zudem leicht zu merkende Zahlenwerte zur Folge, was bei der Verbraucherakzeptanz von Vorteil sein könnte. Da sich die Kennzahl automatisch den geltenden Grenzwerten anpasst, hat die Skala dieser Kennzahl zudem unabhängig von der technischen Entwicklung Bestand: Ein Wert von 0.7 für die relative Effizienz bedeutet beispielsweise immer, dass das entsprechende Fahrzeug deutlich besser ist als die aktuellen Grenzwerte.

Auf der Negativseite steht eine – verglichen mit absoluten Energieverbräuchen – komplexere Berechnung. So reicht beispielsweise ein einfacher Blick auf die Tankanzeige nicht mehr aus, um zu beurteilen, ob ein Fahrzeug auch im realen Betrieb die Effizienzgrenzwerte einhält.



Soll aus den beschriebenen Berechnungsmodellen eine konkrete Regulierungsvorschrift entwickelt werden, zu ist zu beachten, dass nicht nur während der Fahrt, sondern auch beim Tanken sowie beim Parken des Fahrzeugs abhängig vom Antriebssystem zusätzliche Energieverluste auftreten können. Dies betrifft vor allem den Ladevorgang bei batterieelektrischen Fahrzeugen (Verluste sowohl in der Batterie als auch im Ladegerät) sowie Tankdiffusion (bei gasförmigen Kraftstoffen) und ggf. Selbstentladung der Batterie.

## 6 Instrumentarium zur Effizienzregulierung

Bei der Anwendung der in Kap. 5 entwickelten Methoden zur Effizienzbewertung gibt es verschiedene Freiheitsgrade: Die Umsetzung kann in Form einer Grenzwertregulierung erfolgen oder auf monetäre Anreize setzen. Die Grenzwerte können absolut, zeitlich gestaffelt oder nach dem Top-Runner-Prinzip festgelegt werden. Wird die Effizienzbewertung zur Verbraucherinformation eingesetzt, sind zudem verschiedene Differenzierungsstufen denkbar.

Im vorangegangenen Abschnitt wurden zwei verschiedene Methoden vorgestellt, mit denen sich die Effizienz von Fahrzeugen quantitativ bestimmen lässt. Diese Methoden können nun auf unterschiedliche Art und Weise im Rahmen einer Effizienzgesetzgebung angewandt werden. Die folgenden Abschnitte bieten einen Überblick möglicher struktureller Ansätze und Optionen für eine Effizienzgesetzgebung. Diese sind zum großen Teil nicht spezifisch für die Effizienzthematik, sondern lassen sich vielmehr auf sämtliche regulatorische Vorgaben im Fahrzeugbereich anwenden.

### 6.1 Umsetzung der Effizienzbewertung

Der Umsetzungsmodus differenziert sich nach dem Grad der Verbindlichkeit, mit der staatliche Vorgaben durchgesetzt werden. Entsprechend den Instrumenten, die der Gesetzgeber zur Verfügung hat, existieren im Wesentlichen drei Anwendungsfelder für eine Effizienzbewertung:

- Grenzwertregulierung. Hierbei werden die Hersteller direkt und verpflichtend adressiert. Eine Grenzwertgesetzgebung kann sich entweder auf einzelne Fahrzeuge beziehen (wie bei den Euro-Stufen für den Schadstoffausstoß) oder auf die gesamte Neuwagenflotte eines Herstellers (wie bei den Flottengrenzwerten für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß). Wird die gültige Schadstoffnorm verfehlt, so erhält das Fahrzeug keine Zulassung. Überschreitet ein Hersteller seinen CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwert, so hat er Strafzahlungen zu entrichten, die auf bis zu 90 € pro Fahrzeug und zusätzlichem Gramm/km belaufen.
- Fiskalische/Monetäre Anreize. Diese können sowohl im Rahmen der Steuergesetzgebung (Energiebesteuerung, Kfz-Steuer) als auch in Form von direkten Zuschüssen bzw. Bonus-Malus-Systemen („Feebate“) umgesetzt werden. Zuschüsse im Kfz-Bereich gab es in Deutschland bundesweit zuletzt 2009 im Zuge der Abwrackprämie, derzeit sind sie für Elektroautos im Gespräch, um deren Markthochlauf anzukurbeln. Während Zuschüsse für den Staat Kosten bedeuten, kann ein Feebate-System kostenneutral gestaltet werden: Was besonders vorteilhafte Fahrzeuge im Sinne der Regulierung als Zuschuss bekommen, müssen nachteilhafte Fahrzeuge als Strafe zahlen. Frankreich bspw. hat zur Regulierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zusätzlich zum EU-Flottengrenzwert ein Feebate-System eingeführt (Cullbridge 2012).
- Verbraucherinformation. Hierzu gehören z.B. Labels wie das Pkw-Effizienzlabel (Bundesregierung 2011). Es teilt Neuwagen entsprechend ihres gewichtsspezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in Effizienzklassen ein und muss bei Fahrzeugverkäufen stets für den Kunden sichtbar sein. Verbraucherinformation findet jedoch auch im Rahmen öffentlich zugänglicher Rankings von nichtstaatlicher Stellen (z.B. EcoTest des ADAC oder Auto-Umweltliste des VCD) sowie Online-Tools statt, die Verbrauchern die Möglichkeit geben, verschiedene Fahrzeuge interaktiv zu vergleichen. In den USA bietet beispielsweise die Umweltbehörde EPA ein solches Portal an (EPA 2012b).  
Bezüglich der Wirksamkeit von Verbraucherinformation speziell im Kraftfahrzeugbereich gibt es unterschiedliche Ansichten. Nach unserer Überzeugung stellt eine konse-

quente Grenzwertgesetzgebung den deutlich zuverlässigeren Weg zur Effizienzsteigerung der Fahrzeugflotte dar und Verbraucherinformationen können hier allenfalls flankierend wirken. Ein Vorschlag dazu findet sich in Anhang C.

## 6.2 Bestimmung der Referenzwerte

Referenzwerte (im Fall von Anreizsystemen) bzw. Grenzwerte (im Fall von gesetzlichen Vorgaben) können auf verschiedenen technischen und naturwissenschaftlichen Grundlagen beruhen und sind in der Regel das Ergebnis politischer Prozesse. Grundsätzlich gibt es dabei verschiedene Formen zur Ausgestaltung von Vorgaben:

- **Absolute Vorgabe.** Die beschlossenen Referenzwerte gelten bis zur Änderung durch erneute politische Beschlüsse.  
Dieses Verfahren eröffnet maximalen politischen Spielraum. Die technische Entwicklung wird jedoch nicht automatisch berücksichtigt, ebenso wenig wie Randbedingungen, die sich in absehbarer Weise ändern. Bei der Energieverbrauchskennzeichnung von Elektrogeräten hat die absolute Vorgabe der Effizienzstufen zum Beispiel dazu geführt, dass ein Kühlschrank der Klasse A heute zu den schlechtesten am Markt verfügbaren Geräten gehört. Ein Beispiel für absolute Vorgaben im Kfz-Bereich sind die Abgasnormen (Euro-Stufen), die wiederholt an aktuelle Problemlagen der Luftreinhaltung angepasst wurden.
- **Vorgabe der zeitlichen Entwicklung.** Die Höhe der Referenzwerte wird für einen gewissen Zeithorizont im Vorhinein festgelegt. Dabei kann es sich um absolute Werte für einzelne Zeitspannen oder um eine festgelegte zeitabhängige Funktion (z.B. eine jährliche Minderungsrate) handeln.  
Die Vorteile liegen hier in der Planungssicherheit, die vor allem für die Hersteller wichtig ist. Allerdings können technische Potentiale oft nicht hinreichend im Voraus abgeschätzt und bei Erlass der Regulierung berücksichtigt werden.  
Ein Beispiel für die Vorgabe einer zeitlichen Entwicklung ist die geplante Energieeffizienzrichtlinie, die für den Endenergieabsatz eine jährliche Minderungsrate vorsieht (Europäischer Rat 2012). Der Verkehrssektor wird hierbei jedoch lediglich optional berücksichtigt.
- **Top-Runner-Prinzip.** Hierbei werden in bestimmten Zeitabständen die effizientesten Fahrzeuge auf dem Markt ermittelt. Deren Eigenschaften werden dann nach einer festgelegten Zeitdauer zum Maßstab der Regulierung.  
Ein Top-Runner-System kann prinzipbedingt nur Vorgaben machen, die technisch auch erreichbar sind, andererseits wird der technische Spielraum bestmöglich ausgenutzt. Es kommt in der Regel zu einer Belebung des Wettbewerbs zwischen den Herstellern. Andererseits schränkt das System die Planungssicherheit für Hersteller ein, da sie ohne die neuesten Technologien aus dem Markt gedrängt werden können.  
Da ein Top-Runner-System auf dem Vergleich zwischen konkreten Fahrzeugen beruht, ist es hier unter Umständen notwendig, Fahrzeuge in verschiedene Segmente einzuteilen.

## 6.3 Differenzierung des Indikators

Vorgaben für die Effizienz können sich entweder auf einen Gesamtindikator beziehen oder zwischen verschiedenen Größen differenzieren, die die Gesamteffizienz beeinflussen. Eine solche Differenzierung macht die Vorgaben zwar insgesamt komplexer, kann aber die Transpa-

renz und damit den Nutzen des Bewertungssystems sowie dessen Anpassungsfähigkeit an die technische Entwicklung verbessern. Folgende Differenzierungen bieten sich an:

- **Einsatzzweck / Fahrprofil.** Die Effizienz eines Antriebs hängt in der Regel vom Belastungsprofil ab. Verbrennungsmotoren erreichen ihren maximalen Wirkungsgrad nur in einem relativ engen Bereich des Kennfelds; insbesondere bei Teillastbetrieb, wie er für den Stadtverkehr typisch ist, ist die Effizienz gering. Bei Elektromotoren verhält es sich umgekehrt: Ihr Wirkungsgrad ist über einen weiten Bereich des Kennfelds in etwa konstant, ihre Fähigkeit zur Rückgewinnung von Bremsenergie können sie jedoch besonders im dynamischen Stadtverkehr ausnutzen.  
Die Effizienz kann z.B. getrennt für den Betrieb innerorts und außerorts angegeben werden. Bereits die aktuelle Kennzeichnungsverordnung gibt den Kraftstoffverbrauch in dieser Differenzierung zusätzlich zum kombinierten Wert an. Dem Kunden wird dadurch eine realistischere Einschätzung seines vermutlichen Realverbrauchs ermöglicht.
- **Betriebsmodus.** Diese Unterscheidung ist für Fahrzeuge relevant, bei denen der Fahrer zwischen mehreren Betriebsmodi wählen kann. Sie betrifft also insbesondere Plug-In-Hybride, bei denen der Fahrer den rein elektrischen Betrieb in der Regel erzwingen kann.  
Fahrer, die eher kurze Strecken fahren und ihr Fahrzeug in der Regel nach der Fahrt aufladen, können sehr hohe Anteile elektrischen Betriebs erreichen. Zudem wird emissionsfreier Betrieb in bestimmten Zonen (z.B. in Innenstädten) zukünftig möglicherweise verpflichtend. In diesen Fällen wäre eine separate Effizienzbeurteilung des reinen Elektrobetriebs ein relevanter Indikator.  
In den USA wird der Stromverbrauch bei PHEV im rein elektrischen Betrieb bereits heute getrennt ausgewiesen (EPA 2012a).
- **Getrennte Bewertung der Antriebseffizienz und der Fahrwiderstände des Fahrzeugs.** Im Rahmen einer Verbraucherinformation können dem Kunden hierdurch zusätzliche Informationen an die Hand gegeben werden. Erläuterungen und ein Beispiel dazu sind in Anhang C zu finden.
- **Vorgabe einzelner Fahrzeugparameter.** Hierzu muss zunächst ein abstraktes Modell des Fahrzeugs definiert werden. Die Effizienzvorgaben werden dann für einzelne Parameter gemacht, wie z.B. für den Luftwiderstandsbeiwert, den Isolationswert der Verglasung oder den Wirkungsgrad des Motors in bestimmten Betriebspunkten. Zudem können bestimmte effizienzsteigernde Systeme vorgeschrieben werden, wie z.B. eine Abgaswärmerückgewinnung.  
Der Ansatz lehnt sich an die Energieeinsparverordnung (EnEV) im Gebäudebereich an. Er erlaubt eine sehr genaue Anpassung der Anforderungen an den Stand der Technik. Zudem muss das Fahrzeug dann (zumindest theoretisch) nicht mehr einen konkreten Prüfzyklus durchlaufen, da die Verbrauchswerte für beliebige Einsatzfälle berechnet werden können. So wäre es im Prinzip sogar für den Käufer möglich, Verbräuche für sein persönliches Fahrprofil im Vorhinein zu berechnen.  
Dem steht ein hoher Aufwand für die Datenerhebung sowie für die laufende Anpassung an den Stand der Technik gegenüber. Etliche der erforderlichen Angaben würden Betriebsgeheimnisse der Hersteller berühren. Diesen würde zudem die Entscheidungsfreiheit genommen, auf welche Weise sie Effizienzverbesserungen erreichen möchten. Schließlich ist fraglich, ob es angesichts der technischen Komplexität moderner Fahrzeuge überhaupt möglich wäre, ein Modell zu erstellen, das alle möglichen Optionen beim Fahrzeugbau integriert.

## 6.4 Die „Regulierungsmatrix“

Aus den einzelnen Freiheitsgraden der Regulierung, die in den vorhergehenden Abschnitten dargestellt wurden, ergibt sich eine Optionsmatrix, in der mögliche Regulierungsschemata verortet werden können (Abbildung 2). Die Ablösung der bereits bestehenden CO<sub>2</sub>-basierten Vorgaben durch Effizienzvorgaben kann schrittweise erfolgen. Daher sind die derzeitigen Vorgaben als Ausgangssituation ebenfalls in die Matrix eingetragen. eine detaillierte tabellarische Übersicht hierzu findet sich im Anhang A.

Abbildung 2: Matrixdarstellung möglicher Regulierungsmechanismen

		Grenzwerte		Anreize	Verbraucherinformation			
		keine	keine	keine	Fahrprofil	Betriebsmodus	Antrieb / Fahrzeug	
absolut	Flottengrenzwerte	Bsp. 1	CO <sub>2</sub> -abhängige Kfz-Steuer	Pkw-CO <sub>2</sub> -Label			siehe Anhang C	
zeitl. Entwicklung								
Top-Runner		Bsp. 2		EcoTest				
				AuLi				

Die Matrix enthält nicht sämtliche Kombinationsmöglichkeiten: Eine Differenzierung nach Fahrprofil bzw. Betriebsmodus kann im Sinne einer Verbraucherinformation zwar sinnvoll sein, um dem Kunden den Kauf eines für seinen Einsatzzweck optimalen Fahrzeugs zu ermöglichen. Im Sinne einer Grenzwertgesetzgebung bringt diese Differenzierung jedoch keinen Mehrwert, zumal eine zukünftige Typgenehmigung nach WLTP eventuell realitätsnähere Verbrauchsangaben ermöglicht. Die Differenzierung nach Betriebsmodus betrifft zudem lediglich Plug-In-Hybridfahrzeuge

In die Matrix sind zwei konkrete Beispiele für mögliche zukünftige Effizienzvorgaben eingetragen, die im Anhang B skizziert und bewertet werden. Im Sinne einer Verbraucherinformation könnte auch eine gesonderte Betrachtung der Antriebseffizienz interessant sein; Möglichkeiten hierzu werden in Anhang C diskutiert.

## 7 Quellenverzeichnis

- Bundesregierung (2011): Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung vom 28. Mai 2004 (BGBl. I S. 1037), die zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 10. Mai 2012 (BGBl. I S. 1070) geändert wurde.
- EPA (2012a): New Fuel Economy and Environment Labels for a New Generation of Vehicles. Online unter: <http://www.epa.gov/carlabel/420f11017.pdf> (letzter Zugriff: 14.12.2012)
- EPA. (2012b) The official U.S. government source for fuel economy information. Online unter: [www.fueleconomy.com](http://www.fueleconomy.com) (letzter Zugriff: 14.12.2012)
- Europäischer Rat (2012): Entwurf Energieeffizienzrichtlinie (Stand 26. Juni 2012). Brüssel.
- Helms, H./Jöhrens, J./ Hanusch, J./ Höpfner, U./ Lambrecht, U./Pehnt, M. (2011). UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität: Grundlagenbericht. Berlin.
- Herbener, R./Jahn, H. (2006): CO<sub>2</sub>-Minderung bei Pkw: Arbeitspapier.
- IEA (2010): World Energy Outlook 2010. Paris. Online unter: <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo2010.pdf> (letzter Zugriff: 14.12.2012)
- IPCC. (2008): Klimaänderung 2007: Synthesebericht. Berlin. Online unter: Retrieved from [http://www.de-ipcc.de/\\_media/IPCC-SynRepComplete\\_final.pdf](http://www.de-ipcc.de/_media/IPCC-SynRepComplete_final.pdf) (letzter Zugriff: 14.12.2012)
- Jöhrens, J./ Helms, H. (2012). Comparing drive train concepts beyond GHG emissions: An efficiency approach. Konferenzbeitrag: *19th International Transport and Air Pollution Conference 2012*. S. 1-7.
- Kampman, B. et al. (2012): Shifting renewable energy in transport into the next gear: Developing a methodology for taking into account all electricity, hydrogen and methane from renewable sources in the 10% transport target. Delft.
- KBA (2011): Neuzulassungen 2011. Online unter: [http://www.kba.de/cln\\_032/nn\\_1213624/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen\\_\\_node.html?\\_\\_nnn=true](http://www.kba.de/cln_032/nn_1213624/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen__node.html?__nnn=true) (letzter Zugriff: 14.12.2012)
- Knörr, Wolfram (2012): Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell : Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMODO, Version 5.2), im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau
- Universität Magdeburg (2012): Heizwerte und Brennwerte. Online unter: [http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel3\\_VerbrennungSS2003.pdf](http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel3_VerbrennungSS2003.pdf) (letzter Zugriff: 14.12.2012)
- Oeko-Institut (2011): OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Berlin.
- Cullbridge Marketing and Communications (2012): Tools Of Change: France's Feebate for Fuel Efficient Vehicles. Online unter: <http://www.toolsofchange.com/en/case-studies/detail/655> (letzter Zugriff 14.12.2012)
- UBA (2010): Emissionsberichterstattung der Bundesrepublik Deutschland 2010. Dessau.
- UBA (2012): CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Quellkategorie. Dessau. Online unter: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2842> (letzter Zugriff: 14.12.2012)

UN/ECE (2012): Regelung Nr. 101: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Personenkraftwagen, die nur mit einem Verbrennungsmotor oder mit Hybrid-Elektro-Antrieb betrieben werden, hinsichtlich der Messung der Kohlendioxidemission und des Kraftstoffverbrauchs und/oder der Messung des Stromverbrauchs und der elektrischen Reichweite sowie der nur mit Elektroantrieb betriebenen Fahrzeuge der Klassen M 1 und N 1 hinsichtlich der Messung des Stromverbrauchs und der elektrischen Reichweite. Deutsche Fassung. Online unter:  
<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/44904/publicationFile/59055/r-101-messung-co2-und-kraftstoffverbrauch-pdf.pdf> (letzter Zugriff: 14.12.2012)

## Anhang

### A Bisherige Ziele und Instrumente zur THG-Reduktion im Straßenverkehr

Tabelle 6: Ziele und Instrumente zur Reduktion der THG-Emissionen im Straßenverkehr (mit Anmerkungen)

Regulierung	Bereich	Bemerkungen
Flottengrenzwerte	EU	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hersteller müssen die CO<sub>2</sub>-Auspuffemissionen ihrer Fahrzeugflotte bis 2015 auf durchschnittlich 130 g/km reduzieren</li> <li>• Beitrag einzelner Hersteller hängt vom Fahrzeuggewicht ihrer Flotte ab</li> <li>• Fahrzeuge mit Emissionen &lt; 80 g/km werden bis 2016 mehrfach angerechnet</li> <li>• Emissionsmessung im Typgenehmigungsverfahren (Neuer Europäischer Fahrzyklus, NEFZ) nach ECE R-101 (UNECE 2012)</li> </ul>
Erneuerbare-Energien-Richtlinie	EU	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 % Erneuerbare Energie im Verkehrssektor bis 2020</li> <li>• Erreichung wahrscheinlich hauptsächlich über Biokraftstoffe und kaum durch elektrische Antriebe (Kampman 2012)</li> </ul>
Pkw-Effizienzlabel	D (staatlich)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbraucherinformation: Einstufung von Neufahrzeugen in Effizienzklassen (A+ bis G)</li> <li>• basiert auf den CO<sub>2</sub>-Auspuffemissionen nach Typgenehmigung</li> <li>• abhängig vom Fahrzeuggewicht</li> </ul>
CO <sub>2</sub> -abhängige Kfz-Steuer	D (staatlich)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berechnung der Kfz-Steuer basiert zur Hälfte auf Hubraum und zur Hälfte auf dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß nach Typgenehmigung</li> <li>• Elektrofahrzeuge sind für die ersten 10 Jahre von der Kfz-Steuer befreit</li> </ul>
Energiekonzept der Bundesregierung	D (staatlich)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehr bis 2020 um 10 % und bis 2050 um 40 % (jeweils ggü. 2005)</li> <li>• unverbindliches politisches Ziel</li> </ul>
EcoTest	D (ADAC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub>-Emissionen Well-to-Wheel (+ Schadstoffe)</li> <li>• Bewertung mit 1 bis 5 Sternen</li> </ul>
Auto-Umweltliste	D (VCD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub>-Emissionen Well-to-Wheel (+Schadstoffe + Lärm)</li> <li>• jährlich aktualisierte Rangliste</li> </ul>



## B Beispiele für mögliche Regulierungsmodelle

### B 1 Regulierungsbeispiel 1: Flottengrenzwert für Effizienz

Im ersten Beispiel wird im Wesentlichen die aktuell gültige, CO<sub>2</sub>-basierte EU-Pkw-Effizienzregulierung auf den Energieverbrauch übertragen. Dies würde nur vergleichsweise geringe Änderungen am derzeitigen regulatorischen Prozedere erfordern.

Für die Berechnung wird der relative Energieverbrauch  $V_{rel}$  nach Modell 2 (Abschnitt 5.2) zugrunde gelegt, der kleiner als 1 ist, wenn ein Fahrzeug die Effizienzanforderungen erfüllt. Dazu müssen zunächst die Anforderungen festgelegt, also für sämtliche Energieträger Referenzverbräuche bestimmt werden. Mit diesen Referenzwerten kann nun für jedes einzelne Fahrzeugmodell der relative Verbrauch bestimmt werden. Dieser wird anschließend für sämtliche Neuzulassungen (NZL) eines Herstellers gemittelt, um die Konformität des jeweiligen Herstellers mit den Effizienzanforderungen zu überprüfen: Ist der mittlere relative Verbrauch kleiner als 1, so erfüllt der Hersteller die Anforderungen:

$$V_{rel} (\text{Flottendurchschnitt eines Herstellers}) = (\text{rel. Verbrauch}_{Fzg.1} * NZL_{Fzg.1}) + (\text{rel. Verbrauch}_{Fzg.1} * NZL_{Fzg.1}) + \dots < \mathbf{1} ?$$

wobei der relative Verbrauch wie oben bestimmt wird:

$$\text{relativer Verbrauch} = \frac{\text{Benzinverbrauch}}{\text{Benzin} - \text{Referenzwert}} + \frac{\text{Stromverbrauch}}{\text{Strom} - \text{Referenzwert}} + \dots$$

In dieser Form berücksichtigt die Formel keine Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrzeugmodellen. Ist dies gewünscht, so kann die Formel auf einfache Weise erweitert werden. Soll beispielsweise der Effizienzstandard auf die Grundfläche („footprint“) der Fahrzeuge bezogen werden, so wird die obige Formel zu

$$\begin{aligned} & \text{rel. Verbrauch (Flottendurchschnitt eines Herstellers)} \\ & = \left( \frac{\text{rel. Verbrauch}_{Fzg.1}}{\text{rel. Grundfläche}_{Fzg.1}} * NZL_{Fzg.1} \right) + \left( \frac{\text{rel. Verbrauch}_{Fzg.2}}{\text{rel. Grundfläche}_{Fzg.2}} * NZL_{Fzg.2} \right) + \dots \\ & < \mathbf{1} ? \end{aligned}$$

wobei die relative Grundfläche dem Verhältnis der Fahrzeuggrundfläche zur durchschnittlichen Grundfläche aller Fahrzeuge entspricht. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Effizienzanforderungen im Mittel für die gesamte Neuwagenflotte eingehalten werden.

Welche Lenkungswirkung eine solche flottenbasierte Effizienzregulierung entfaltet, hängt entscheidend von der Wahl der Referenzwerte ab. Ihre Höhe relativ zueinander bestimmt wesentlich die Prioritäten der Autohersteller bei der Entwicklung der verschiedenen Antriebe. Um eine Effizienzsteigerung zu möglichst geringen volkswirtschaftlichen Kosten zu gewährleisten, muss die Wahl der Grenzwerte auf belastbaren Annahmen zu den Potentialen der verschiedenen Antriebstechnologien basieren.

Um den Übergang von der bisherigen emissionsbasierten zu einer effizienzbasierten Gesetzgebung möglichst nahtlos zu gestalten, ist eine Einführung der Effizienzstandards parallel zur bisherigen CO<sub>2</sub>-Regulierung denkbar. Hierbei könnten die Grenzwerte im Sinne eines „Phase-in“ zunächst so angesetzt werden, dass sie von den Herstellern in der Regel ohnehin erreicht

werden. Aus dem Abstand zum Grenzwert können die Hersteller dann ersehen, an welchen Punkten verstärkte Effizienzanstrengungen notwendig sind. Beispielsweise hat Erdgas bezogen auf den Energiegehalt gegenüber Diesel einen um etwa ein Viertel niedrigeren Kohlenstoffgehalt, wodurch Erdgasantriebe bei der derzeitigen CO<sub>2</sub>-basierten Regulierung begünstigt sind. Da Erdgas- und Benzinantriebe aber technisch sehr ähnlich sind, müssten für diese beiden Energieträger bei einer effizienzbasierten Regulierung langfristig auch gleiche Grenzwerte gelten. Die Effizienzregulierung hilft somit, Effizienzpotentiale beim Erdgasantrieb zu heben, die durch eine CO<sub>2</sub>-Regulierung nicht adressiert werden.

## B 2 Regulierungsbeispiel 2: Flotteneffizienzgrenzwert nach dem Top-Runner-Prinzip

Dieses Beispiel ist ebenfalls im Bereich der Grenzwertgesetzgebung angesiedelt, wobei die Grenzwerte nach dem Top-Runner-Prinzip ermittelt werden. Indikator ist wieder die relative Effizienz nach Modell 2 (Kap. 5.2), es wird also für jeden Energieträger ein maximaler Verbrauch pro Kilometer festgelegt. Wird keine weitere fahrzeugspezifische Bezugsgröße verwendet, sondern der Verbrauch allein auf den Kilometer bezogen, hängt die relative Effizienz entscheidend von der Fahrzeuggröße ab. Sofern ein einheitlicher Grenzwert für alle Größen gelten soll, ist es daher sinnvoll, diesen nicht auf einzelne Fahrzeuge, sondern auf den Durchschnitt der gesamten Fahrzeugflotte eines Herstellers zu beziehen (Flottengrenzwert).

Um die aktuellen Top-Runner zu ermitteln, wird anhand der Typgenehmigungsdaten von sämtlichen Neufahrzeugen der spezifische Verbrauch (pro km) für jeden Kraftstoff einzeln bestimmt. Bei Plug-In-Hybridfahrzeugen bedeutet dies, die Verbrauchsdaten im autarken Modus (kein Netto-Verbrauch an Elektroenergie) und im rein elektrischen Modus getrennt auszuwerten.

Für jeden Energieträger werden die jeweils niedrigsten gemessenen Verbrauchswerte z.B. 10 Jahre später<sup>4</sup> zum Flottengrenzwert. Das bedeutet, dass dann für sämtliche Neuzulassungen anhand der Typgenehmigungsdaten die relative Effizienz nach Modell 2 ermittelt wird. Liegt diese für die Neuwagenflotte eines Herstellers durchschnittlich unter 1, so verfehlt der Hersteller die Flottengrenzwerte und kann entsprechend sanktioniert werden.

In dieser Form werden Hersteller mit einem hohen Verkaufsanteil großer Fahrzeuge benachteiligt. Um zu erreichen, dass alle Hersteller gleichermaßen einen Beitrag zur Steigerung der Effizienz leisten müssen, kann man den Energieverbrauch am Rad auf eine „Nutzgröße“ beziehen. Eine technologieneutrale Größe dafür wäre z.B. die Grundfläche des Fahrzeugs oder die Fläche zwischen den Achsen („footprint“). Das Gewicht als Bezugsgröße, wie beim derzeitigen CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwert, macht dagegen Leichtbau weniger attraktiv. Alternativ zu einer Bezugsgröße kommen auch separate Grenzwerte für einzelne Fahrzeugsegmente in Frage. Dies setzt jedoch voraus, dass die Einordnung in diese Segmente eindeutig möglich ist, was nicht immer gegeben ist.

Eine Effizienzbewertung nach dem Top-Runner-Prinzip könnte einer Reihe von Verbrauchsminderungstechniken bei Verbrennungsmotoren zum Durchbruch verhelfen, die aktuell nur in einem kleinen Teil der Fahrzeugflotte eingesetzt werden und für die Hersteller oftmals hohe Aufpreise verlangen. Auf der anderen Seite könnten Autos durch den dann notwendigen Einsatz dieser Technologien tendenziell teurer werden, sofern die Preise für diese Technologien nicht durch höhere Stückzahlen sinken (Skaleneffekt). Hier ist insbesondere die klassische

---

<sup>4</sup> Bei der Regulierung von Elektrogeräten werden 5 Jahre angesetzt. Aufgrund der langen Entwicklungszeit von Kraftfahrzeugen scheint jedoch ein längerer Zeitraum angemessen.

Hybrid-Technik (ohne Lademöglichkeit über das Stromnetz) betroffen, denn diese hat nach heutigem Stand von allen Einzelmaßnahmen das mit Abstand größte Potential zur Verbrauchsminderung. Langfristig stärkt der induzierte Technologieschub aber die Position der betroffenen Hersteller im internationalen Wettbewerb.

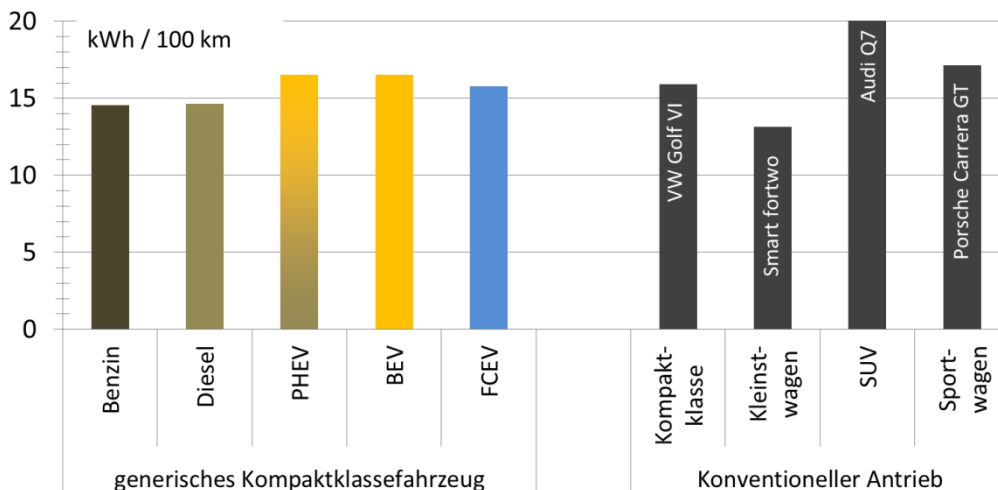
## C Alternatives Modell zur Effizienzbewertung: Differenzierung in Antrieb und Fahrzeug

### C 1 Konzept

In den Berechnungsmodellen 1 (absoluter Verbrauch, Kap. 5.1) und 2 (relativer Verbrauch, Kap. 5.2) wurde das Fahrzeug als eine Einheit betrachtet, die einen Energieinput in einen Kilometeroutput umwandelt. Die Fahrwiderstände eines Autos sind dabei ein wichtiger Einflussfaktor, jedoch zum großen Teil durch die Wahl des Fahrzeugtyps festgelegt. Ein Geländewagen ist bspw. in der Regel schwerer und hat einen höheren Luftwiderstand als ein Kleinwagen. Ist für den Konsumenten die Entscheidung für einen Fahrzeugtyp jedoch bereits gefallen, dann verliert der Gesamtverbrauch an Aussagekraft. Der Antriebsstrang hat demgegenüber einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Fahrwiderstände (Abbildung 3) – am wichtigsten ist hier noch das Zusatzgewicht durch die Batterie bei PHEV und BEV.

Eine separate Betrachtung der Energieeffizienz für den Antriebsstrang und die Fahrwiderstände würde es ermöglichen, die Effizienz des Antriebsstrangs weitgehend unabhängig von der Fahrzeugklasse zu bewerten (die für die meisten Fahrzeugkäufer von vorn herein feststeht). Die Angaben wären damit zielgerichteter und könnten die Ausschöpfung des jeweils vorhandenen Effizienzpotentials innerhalb einer bestimmten Fahrzeugklasse besser darstellen. Gleichzeitig würden insbesondere Käufer großer und schwerer Fahrzeuge für deren typbedingte Ineffizienz sensibilisiert. So könnten gerade in diesem ohnehin hochpreisigen Bereich Leichtbau und andere fahrzeugseitige Effizienzmaßnahmen angereizt werden (z.B. durch Leichtbau, Leichtlaufreifen u.a.).

Abbildung 3: Energieverbräuche am Rad für ein Fahrzeug der Golfklasse mit verschiedenen Antrieben (links) sowie verschiedene Fahrzeugklassen mit Verbrennungsmotor (rechts) im Vergleich (Jöhrens and Helms 2012)



### C 2 Berechnungsmethodik

Der spezifische Verbrauch (siehe Abschnitt 5.1) ist der Quotient aus Energieverbrauch am Rad  $V^F$  und Antriebswirkungsgrad  $\eta$ :

$$\text{spezifischer Verbrauch} = \frac{\text{Energieverbrauch am Rad (pro km)}}{\text{Antriebswirkungsgrad}} = \frac{V^F}{\eta}$$

Der Energieverbrauch am Rad  $V^F$  hat die Einheit Kilowattstunden pro Kilometer. Er ist unabhängig vom Antriebskonzept und hängt allein von den Fahrwiderständen ab. Diese ergeben

sich aus der Massenträgheit des Fahrzeugs (Beschleunigung), seiner Gewichtskraft (Steigungen) sowie Luft- und Rollwiderstand. Sie können leicht aus dem Geschwindigkeitsprofil des Testzyklus und elementaren Fahrzeugparametern (Masse, Frontfläche, Luft- und Rollwiderstandsbeiwert) berechnet werden, die bei der Typgenehmigung von Fahrzeugen ohnehin erfasst werden.

Wird der Energieverbrauch am Rad absolut angegeben (also in kWh / km), so ist die Fahrzeuggröße der dominierende Faktor. Eine entsprechende Regulierung würde demnach kleine Fahrzeuge bevorzugen. Um Fahrzeuge unterschiedlicher Größe in Bezug auf Effizienz des Fahrzeugdesigns vergleichen zu können, kann man den Energieverbrauch am Rad auch auf einen Referenzwert beziehen. Dieser kann von technologieunabhängigen Parametern wie der Grundfläche des Fahrzeugs oder auch von der Fahrzeugklasse abhängen, sofern eine Einordnung der Fahrzeuge in Klassen zweifelsfrei möglich ist.

Aus den bekannten Werten für spezifischen Verbrauch und Energieverbrauch am Rad lässt sich problemlos der Wirkungsgrad  $\eta$  des Antriebs berechnen. Dessen absoluter Wert wird entscheidend durch den verwendeten Energieträger bestimmt – bei Elektroantrieben ist der Wirkungsgrad beispielsweise mehr als doppelt so hoch wie bei Verbrennungsmotoren. Es bietet sich daher an, den Wirkungsgrad hier analog zu Kapitel 5.2 auf einen energieträgerspezifischen Referenzwert zu beziehen, um die unterschiedlichen Potentiale der verschiedenen Energieträger zu berücksichtigen. Bei Fahrzeugen, die mit mehreren verschiedenen Energieträgern betrieben werden, muss hier wieder entsprechend Kapitel 5.2 summiert werden, für ein PHEV z.B.

$$\eta_{rel} = \frac{\text{Energieverbrauch am Rad}}{(\text{Benzinverbr.} \cdot \eta_{Benzin}) + (\text{Stromverbr.} \cdot \eta_{Strom})}$$

Sowohl Energieverbrauch am Rad als auch Antriebswirkungsgrad stellen nun eigenständige Indikatoren dar, die z.B. im Rahmen eines Label-Systems getrennt ausgewiesen werden können.

### C 3 Anwendung

Um den Nutzen einer getrennten Ausweisung von Antriebswirkungsgrad und Energieverbrauch am Rad zu veranschaulichen, werden den Beispielfahrzeuge im Folgenden zusätzlich verschiedene Fahrzeugklassen zugewiesen: Das Dieselfahrzeug wird als Kleinwagen angenommen, das Brennstoffzellenfahrzeug als Geländewagen; der PHEV ist nach wie vor ein Kompaktklassewagen. Für diese Fahrzeugkonfigurationen werden nun Energiebedarf am Rad und Antriebswirkungsgrad bestimmt. Ersterer wird in diesem Beispiel absolut berechnet, also ohne Referenzgröße. Der Wirkungsgrad wird relativ zu den beispielhaften Referenzwirkungsgraden in Tabelle 7 angegeben.

Tabelle 8 stellt die Ergebnisse für den Energieverbrauch am Rad und den relativen Wirkungsgrad dar. Der Wirkungsgrad ist hier als Kehrwert dargestellt, um die Vergleichbarkeit mit den anderen Indikatoren zu gewährleisten (d.h. eine hohe Zahl bedeutet hohen Verbrauch und niedrige Effizienz). Zum Vergleich sind die Ergebnisse nach den beiden in Kapitel 0 vorgestellten Berechnungsmodellen aufgeführt.

Der Vergleich des Verbrauchs der verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen stellt sich je nach Berechnungsmodell sehr unterschiedlich dar. Der Diesel-Kleinstwagen hat nach Modell 1 beispielsweise aufgrund der für Verbrennungsmotoren typischen niedrigen Umwandlungseffizienz einen recht hohen Verbrauch in Energieeinheiten. Der relative Verbrauch des Fahrzeugs (Modell 2), bezogen auf die Vorgabe in Tabelle 4, ist jedoch von allen Fahrzeugen am niedrigsten. Ein Blick auf den niedrigen Energieverbrauch am Rad (Modell 3) weist das energieeffizien-

te Fahrzeugdesign als Grund dafür aus. Der Wirkungsgrad des Antriebs ist hingegen nicht nur absolut betrachtet, sondern auch bezogen auf den Referenzwirkungsgrad für Diesel recht gering.

Tabelle 7: Beispielhafte Referenzwirkungsgrade

Energieträger	Wirkungsgrad ( $\eta_K$ ) [%]
Ottokraftstoff	29
Diesekraftstoff	32
elektrischer Strom	75
Wasserstoff	40

Tabelle 8: Beispielfahrzeuge – Kenndaten und Effizienz nach den verschiedenen Berechnungsmodellen

Antrieb	Fahrzeugtyp (Euro-Fzg.klasse)	Masse [kg]	Frontfläche [m <sup>2</sup> ]	Luftwiderstands-beiwert ( $c_w$ )	spez. Verbr. $V$ [kWh / km] (Modell 1, Kap. 5.1)	rel. Verbr. $V^{rel}$ (Modell 2, Kap. 5.2)	1 / (rel. Wirkungsgrad Antrieb $\eta_{rel}$ ) [kWh / kWh]	Energieverbrauch am Rad $V^r$ [kWh / 100 km]
Diesel, konv.	Kleinstwagen (A)	850	1,95	0,37	40,48	1,02	1,32	9,8
Otto, Plug-In-Hybrid	Kompaktklasse (C)	1480	2,1	0,31				13,4
autark					49,64	1,26	1,08	
hybridisch					32,55	1,11	0,97	
rein elektrisch					15,45	1,03	0,87	
Brennstoffzelle	Geländewagen (J)	2780	2,87	0,35	52,87	2,23	0,88	24,0

Da Fragen von Fahrzeuggröße und -design für die Referenzwirkungsgrade keine Rolle spielen, ist deren Festlegung gegenüber den Referenzverbräuchen aus Kap. 5.2 deutlich vereinfacht. Hier geht es (zumindest aus wissenschaftlicher Sicht) einzig darum, das technische Potential der jeweiligen Antriebstechnologie einzuschätzen, während die Festlegung von Referenzverbräuchen stets auch Aussagen über die Zusammensetzung des Fahrzeugmarktes impliziert.

Eine potentielle Schwierigkeit liegt hingegen in der Zuordnung von Nebenverbrauchern: Diese gehören zwar logisch betrachtet eher zum Fahrzeugdesign, zweigen aber Energie aus dem Antriebssystem ab (über die Lichtmaschine bzw. die Nutzung von Motorabwärme zum Beheizen der Fahrgastzelle). Im Prüfzyklus stellt sich dieses Problem allerdings nicht, da hier die (nicht antriebsbedingten) Nebenverbraucher ausgeschaltet sind.

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, wie Antriebs- und Fahrzeugeffizienz im Rahmen einer Verbraucherinformation operationalisiert werden können.

#### C 4 Anwendungsbeispiel: Differenzierte Verbraucherinformation nach dem Top-Runner-Prinzip

Verbraucher haben heutzutage viele Möglichkeiten, Fahrzeuge in Bezug auf ihren Verbrauch und ihre Emissionen zu vergleichen: Dazu zählt das gesetzlich vorgeschriebene Pkw-Label, verschiedene Ranglisten von Nichtregierungsorganisationen sowie Internetangebote wie [Spritmonitor.de](http://Spritmonitor.de), wo Autofahrer ihre Realverbräuche eingeben und mit anderen Fahrern desselben Modells vergleichen können. Ein Vergleich der Energieeffizienz zwischen verschiedenen Kraftstoffen ist damit jedoch derzeit kaum möglich; lediglich das neue „Fuel Economy Label“ in den USA leistet dies durch eine Umrechnung des Stromverbrauchs von elektrischen Antrieben in Kraftstoffäquivalente (EPA 2012a).

Hier setzt dieses Beispiel an. Gemäß Abschnitt C 2 werden unabhängig voneinander die Effizienz des Antriebs und der Energieverbrauch am Rad (bestimmt durch die Fahrwiderstände) bewertet. Im vorangegangenen Abschnitt wurden bereits die Werte für Antriebs- und Fahrzeugeffizienz bei verschiedenen beispielhaften Fahrzeugkonfigurationen dargestellt. Anhand dieser Werte werden die Fahrzeuge nun (separat für die beiden Indikatoren) in ein System von Effizienzklassen eingeordnet, das wie folgt definiert wird: Die Skala reicht analog zur aktuell gültigen Pkw-Energiekennzeichnungsverordnung von A (sehr effizient) bis G (ineffizient). Im Unterschied zur aktuellen Gesetzgebung, die fixe Werte fest schreibt, definiert jedoch jeweils das effizienteste Fahrzeug das obere Ende der Skala. Die weiteren Stufen passen sich dementsprechend an, für die Antriebseffizienz beispielsweise in Abständen von je 5 %: Klasse A für 95-100 % der Maximaleffizienz, Klasse B für 90-95 % usw. Bei der Fahrzeugeffizienz sind die Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrzeugtypen sehr groß, weswegen hier eine größere Spreizung der Effizienzklassen sinnvoll erscheint (hier wurden beispielhaft 10 % pro Klasse gewählt). Tabelle 9 zeigt das entsprechende Ranking der Beispielfahrzeuge.

Tabelle 9: Beispielfahrzeuge – Einordnung in Effizienzklassen nach Modell 3

Fahrzeug	Modus	Antriebseffizienz	Fahrzeugeffizienz
Kleinstwagen (A), Konventionell (Diesel)		E	A
Kompaktklasse (C), Plug-In-Hybrid (Otto)	autark	D	C
	hybridisch	B	
	elektrisch	A	
Geländewagen (J), Brennstoffzelle		D	F

Solch ein Kennzeichnungssystem hätte für Autokäufer mehrere Vorteile: Zum einen könnten sie sofort sehen, ob beispielsweise ein hoher Verbrauch auf den Fahrzeugtyp (und damit auf Nutzerbedürfnisse) oder auf ineffiziente Antriebstechnik zurückgeht. Durch den Vergleich der Fahrzeugeffizienz zwischen verschiedenen Fahrzeugen desselben Typs werden zudem Anstrengungen der Hersteller in Bezug auf intelligentes Fahrzeugdesign sichtbar – so beispielsweise Leichtbau. Zum anderen sorgt die Kopplung der Effizienzklassen an den technischen Fortschritt der innovativsten Marktteilnehmer für zusätzliche Dynamik bei der Entwicklung neuer Effizienztechnologien – es ist auf diese Weise nicht mehr möglich, sich auf einer einmal erworbenen Effizienzeinstufung „auszurufen“.