



# Well-to-Wheel- (WTW-) Analysen von Gasfahrzeugen

überarbeitete Version 2012

erstellt für:

Deutscher Verband Flüssiggas e.V.  
EnergieForum Berlin  
Stralauer Platz 33-34  
10243 Berlin

von:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Heinze,  
Hochschule für Technik und  
Wirtschaft des Saarlandes  
und  
Eng. Claudiu Butnaru  
„Gheorghe Asachi“  
Technical University of Iași

Saarbrücken, August 2012



# Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort .....	3
2	Zielsetzung .....	4
3	WTW in der Literatur.....	5
4	WTW unter Berücksichtigung von homologierten Typprüfwerten der Gasfahrzeuge .....	7
4.1	WTT-Anteil (Fossile Quelle bis Zapfsäule).....	7
4.2	TTW-Anteil (Treibhausgas-Emissionen bei Nutzung des Fahrzeugs im Fahrzyklus) 8	
4.3	WTW-Gesamtkette bei Benzin äquivalentem Wirkungsgrad der Fahrzeuge .....	9
4.4	WTW-Gesamtkette mit Berücksichtigung des realen Wirkungsgrads der Fahrzeuge über deren Typprüfwerte (reale TTW-Anteile).....	9
5	Erhöhung der Fahrwiderstände durch erhöhtes Fahrzeuggewicht von Gasfahrzeugen .....	22
6	Ausblick, CO <sub>2</sub> -Einspartpotential von Gasfahrzeugen.....	23
7	Zusammenfassung.....	24
8	Literatur.....	26

# 1 Vorwort

Zwischen theoretischen und tatsächlichen Umweltvorteilen von Alternativ-Kraftstoffen in der Praxis gibt es deutliche Unterschiede. An der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (HTW) ist die CO<sub>2</sub>-Einsparung durch alternative Gasfahrzeuge im Vergleich zu herkömmlichen Benzinfahrzeugen untersucht worden.

Automobilhersteller sind aktuell dazu verpflichtet, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Kraftstoff-Verbrennung im Motor (TTW = Tank-to-Wheel) anzugeben. Diese Angabe bildet jedoch nur ein Teilsegment ab. Ganzheitlich betrachtet muss auch der davor liegende Aufwand insbesondere für die Förderung und Transport der Kraftstoffe zu den Raffinerien und zu den Tankstellen Berücksichtigung finden. Erst damit sind die tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen definiert, die für die nationalen Emissionsinventare der EU-Mitgliedstaaten verbindlich sind.

Bei der vorliegenden Version handelt es sich um eine überarbeitete Ausgabe der ursprünglichen Ausgabe von 2010. Es wurden die real gemessenen Tank-to-Wheel Anteile der Studie aktualisiert, wobei zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Gasfahrzeugen und für den Vergleich zum Betrieb mit Ottokraftstoff jetzt ausschließlich Neufahrzeuge verwendet werden, die serienmäßig mit Gassystemen ausgestattet sind. Die verwendeten Typprüfwerte wurden dem aktuellsten DAT-Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen, 2.Quartal-2012 (7) entnommen. Die Kraftstoffpfade bzw. Well-to-Tank Anteile wurden nicht aktualisiert, da in der aktuellsten Ausgabe der JEC-Studie (mit WELL-to-TANK Report, Appendix 2, Version 3c, July 2011) die in der vorliegenden Studie verwendeten Zahlen sich nicht geändert haben bzw. nicht ergänzt wurden.

*Saarbrücken, 2. August 2012*

*Prof. Dr.-Ing Thomas Heinze*

*HTW des Saarlandes*

## 2 Zielsetzung

CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen bei der Gewinnung, Bereitstellung und bei der Nutzung von Kraftstoffen. Zur ganzheitlichen Bewertung eines Kraftstoffes muss daher für mobile Anwendungen eine so genannte Well-to-Wheel- (WTW-) Analyse (1) mit einer Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der vollständigen Kette von der Quelle bis zum Antriebsrad erstellt werden. Die WTW-Kette wird üblicherweise in zwei Teilpfade aufgeteilt:

1. WTT: Well-to-Tank, also Aufwände für die Bereitstellung bzw. Emissionen auf dem Weg von der Quelle des Kraftstoffs „zur Zapfsäule“ (identisch „in den Fahrzeugtank“).
2. TTW: Tank-to-Wheel, der Anteil der bei der Nutzung des Fahrzeugs, also während der Verbrennung des Kraftstoffs zur Erzeugung des Vortriebs an den Rädern erforderlich ist.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Gasbetrieb von Pkw mit Autogas (LPG) und Erdgas (CNG) in einer WTW-Studie zu analysieren.

Im ersten Schritt soll eine erste Recherche bezüglich bereits vorhandener WTW-Daten durchgeführt und zusammengefasst werden.

Im zweiten Schritt wird eine neue, alternative WTW-Betrachtung erarbeitet

- a) basierend auf den Stoffeigenschaften der Kraftstoffe und
- b) den realen Typprüfwerten, die während der Homologation<sup>1</sup> der Fahrzeuge offiziell bestimmt werden.

---

<sup>1</sup> Typgenehmigung, u.a. Abgasprüfung vor dem Hintergrund der aktuellen gesetzlichen Vorschriften

### 3 WTW in der Literatur

Die bekannteste und meist zitierte WTW-Studie ist die JEC-Studie (2) die mittlerweile in der 3. Version im Jahr 2008 erschienen ist. Die JEC-Studie wurde im Auftrag der Europäischen Kommission von einem Zusammenschluss erarbeitet aus:

- **J:** JRC, EU's Joint Research Centre
- **E:** EUCAR, European Council for Automotive R&D (Fahrzeughersteller)
- **C:** CONCAWE: Conservation of Clean Air and Water in EU (Mineralölunternehmen)

Weiterhin wurden die folgenden Literaturstellen auf WTW-Daten analysiert:

- (3) Expertenarbeitsgruppe der Bundesregierung, Matrixbericht 2004  
(Datengrundlage überwiegend basierend auf JEC-Studie 2003)
- (4) BOSCH: Hybridantriebe, Brennstoffzellen und alternative Kraftstoffe,  
2008, Gelbe Reihe. (Datengrundlage basierend auf JEC-Studie 2007)
- (5) Daimler: OPTIRESOURCE  
(Datengrundlage basierend auf JEC-Studie 2005)
- (6) BUWAL: Ökopprofile von Treibstoffen, Bern 1998

Die Analyse der WTW-Daten aus den genannten Literaturstellen führte je nach Autor und Annahme von Randbedingungen zu stark unterschiedlichen Ergebnissen. Die Verteilung und große Bandbreite der ermittelten CO<sub>2</sub>-Reduktionen zeigt *Abbildung 1*. LPG wurde nicht in allen Berichten mit analysiert. Somit sind auf bei dem Kraftstoff LPG weniger Balken dargestellt.

## WTW CO<sub>2</sub>-Einsparungen relativ zu Superbenzin

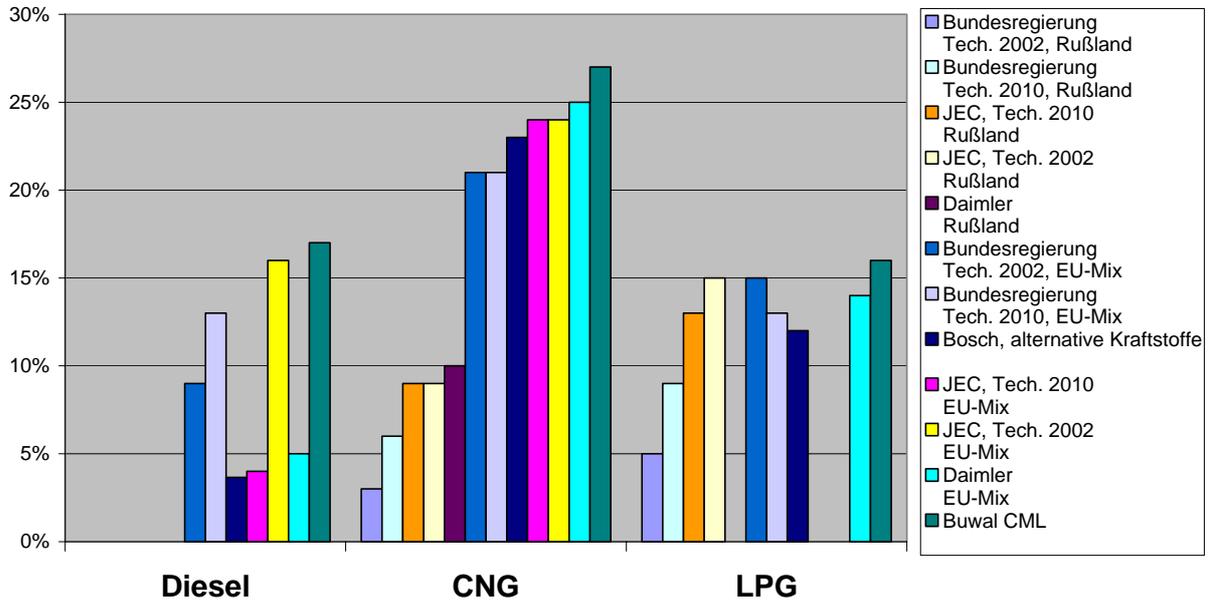


Abbildung 1, WTW-Daten zur CO<sub>2</sub>-Einsparung aus Literaturstellen

Zur Darstellung einer mittleren Tendenz wurden in *Abbildung 2* Mittelwerte mit Streubreiten berechnet. Es zeigt sich sehr deutlich, dass alle Kraftstoffe relativ zu Superbenzin ein signifikantes Potential zu CO<sub>2</sub>-Einsparung haben. Bei der Verwendung von CNG als Kraftstoff spielt der Transportweg zur Zapfsäule eine sehr entscheidende Rolle. Im Fall der Nutzung von räumlich nahen regionalen fossilen Vorkommen kann die CO<sub>2</sub>-Einsparung fast das Zweifache von Diesel bzw. LPG betragen.

### CO<sub>2</sub>equi-WTW-Einsparung relativ zu Superbenzin

(Mittelwerte aus 12 Literaturstellen)

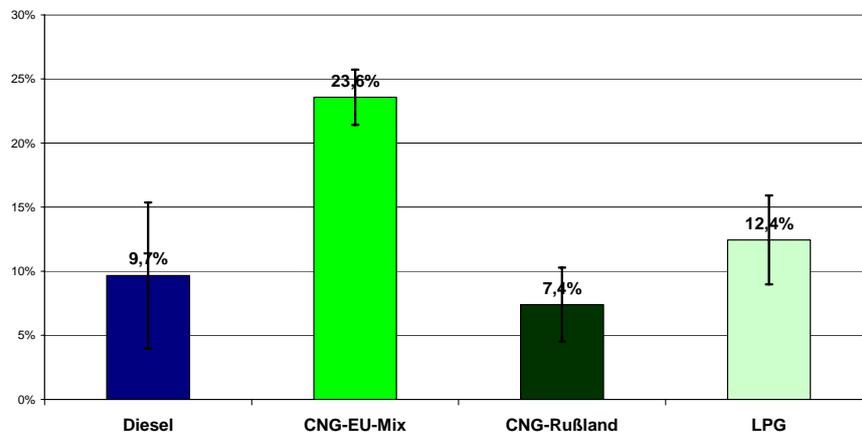


Abbildung 2, gemittelte WTW-Daten zur CO<sub>2</sub>-Einsparung aus Literaturstellen

Berücksichtigt man jedoch, dass in Deutschland für die mobile Anwendung CNG aus weit entfernten Regionen importiert werden muss, so liegt bei CNG der CO<sub>2</sub>-Vorteil ähnlich wie bei Diesel und LPG bzw. fällt bei Import von russischem CNG sogar deutlich schlechter aus.

## 4 WTW unter Berücksichtigung von homologierten Typprüfwerten der Gasfahrzeuge

Der DAT-Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen enthält Vergleichsdaten über Neufahrzeuge, insbesondere CO<sub>2</sub>-Typprüfwerte für die derzeit angebotenen Gasfahrzeuge. Auf Basis dieser Daten werden reale TTW-Daten ermittelt und in der WTW-Kette verwendet.

Die WTW-Berechnungen werden im ersten Schritt auf die in einem beliebigen Fahrzeug verbrauchte Energieeinheit Megajoule (MJ) bezogen und sind damit vollkommen unabhängig von der Wahl des Fahrzeugs.

### 4.1 WTT-Anteil (Fossile Quelle bis Zapfsäule)

Für den WTT-Anteil werden WTT-Daten nach JEC (2) verwendet.

Kraftstoff	JEC-Code	Bemerkung
<b>Benzin</b>	<b>COG1</b>	Conventional gasoline
<b>CNG</b>	<b>GPCG1b</b>	Piped NG (4000 km) to CNG This pathway represents gas imported into the EU through pipelines from the Middle East or South Western Asia, both key regions for the future EU supplies.
<b>LPG</b>	<b>LRLP1</b>	Gas field condensate to LPG C3 and C4 condensates from remote gas field/production are separated treated and liquefied prior to shipping to Europe and distribution as automotive LPG.

Tabelle 1, Kraftstoffpfade nach JEC (2)

Im Fall von CNG wird die Annahme getroffen, dass es sich bei der Verwendung von CNG als Kraftstoff um Zusatzbedarfe handelt, die nicht mehr aus regionalen Quellen gedeckt werden können, vergl. auch dena-Studie, Erdgas und Biomethan im künftigen Kraftstoffmix (8) S. 10, Abb. 8.

Damit ergibt sich entsprechend JEC, WTT APPENDIX 2 zum WELL-TO-TANK Report Version 3.0 November 2008 die folgenden Tabelle der Bereitstellungsaufwände:

	g CO <sub>2</sub> /MJ	Benzin	LPG	CNG	CNG vs LPG
<b>WTT Bereitstellungsaufwand bis in den Fahrzeugtank</b>		12,5	8,0	14,5	-6,5

**Tabelle 2, WTW-Treibhausgasäquivalent**

Der direkte Vergleich zeigt, dass LPG bzgl. der durch die Bereitstellung bedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen am günstigsten liegt. In Zahlen ausgedrückt, LPG hat einen CO<sub>2</sub>-Vorteil von 6,5 g CO<sub>2</sub>/MJ gegenüber CNG und von 4,5 g CO<sub>2</sub>/MJ gegenüber Benzin.

## **4.2 TTW-Anteil (Treibhausgas-Emissionen bei Nutzung des Fahrzeugs im Fahrzyklus)**

Im nächsten Schritt werden über Stoffdaten aus Bosch Kraftfahrtechnisches Taschenbuch (9) die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Energieeinheit bei der Verbrennung abgeschätzt. Der Rechenweg ergibt sich aus der Reihenfolge der Spalten in der folgenden Tabelle. Aus dem Kohlenstoffgehalt und dem Heizwert wird die verbrauchte Kohlenstoffmasse pro MJ berechnet. Anschließend wird dieser Wert im Mol umgerechnet und damit die emittierte CO<sub>2</sub>-Masse/MJ berechnet.

	C-Gehalt	Heizwert		Kohlenstoff bzw. CO <sub>2</sub>		
	Gew-%	MJ/kg	g/MJ	gC/MJ	mol/MJ	gCO <sub>2</sub> /MJ
Benzin	86	43,5	23,0	19,8	1,65	<b>72,5</b>
Propan	82	46,3	21,6	17,7	1,48	64,9
Butan	83	45,6	21,9	18,2	1,52	66,7
LPG (50/50)	82,5	45,95	21,8	18,0	1,50	<b>65,8</b>
CNG	76	47,7	21,0	15,9	1,33	<b>58,4</b>

**Tabelle 3, CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung pro Energieeinheit (MJ)**

Hier zeigt der Vergleich bzgl. der Stoffdaten, dass bei der Verbrennung von LPG(50/50) 6,7 g CO<sub>2</sub>/MJ gegenüber einer Verbrennung von Benzin eingespart werden können. Verglichen mit der Verbrennung von CNG ergibt sich gegenüber LPG(50/50) ein weiterer Vorteil von 7,4 g CO<sub>2</sub>/MJ.

### 4.3 WTW-Gesamtkette bei Benzin äquivalentem Wirkungsgrad der Fahrzeuge

Mit den Daten aus den vorgehenden Tabellen (Tabelle 2 u. Tabelle 3) lässt sich durch Summation der Anteile die WTW Emission bestimmen, s. Tabelle 4.

	g CO <sub>2</sub> /MJ	Benzin	LPG	CNG	CNG vs LPG
<b>WTT Bereitstellungsaufwand bis in den Fahrzeugtank</b>		12,5	8,0	14,5	-6,5
<b>TTW Verbrennung</b>		72,5	65,8	58,4	7,4
<b>WTW Bereitstellung + Verbrennung</b>		<b>85,0</b>	<b>73,8</b>	<b>72,9</b>	<b>0,9</b>

Tabelle 4, WTW-Treibhausgasäquivalent

Bei den hier dargestellten Werten wird vorerst davon ausgegangen, dass durch den Gasbetrieb sich der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs bzw. des gesamten Fahrzeugs bzgl. der Fahraufwände relativ zum Benzinbetrieb nicht ändert. Im Vergleich zu Benzin werden in der WTW-Kette bei der Verwendung von LPG(50/50) 11,2 g CO<sub>2</sub>/MJ und bei CNG 12,1 g CO<sub>2</sub>/MJ eingespart. D.h., obwohl das Kohlen-Wasserstoff-Verhältnis (H/C-Verhältnis) von CNG günstiger ist, liegen bei den CO<sub>2</sub>-Einsparungen beide Gasarten in der ganzheitlichen WTW-Betrachtung sehr eng beieinander, da bei CNG der Bereitstellungsaufwand höher ist.

### 4.4 WTW-Gesamtkette mit Berücksichtigung des realen Wirkungsgrads der Fahrzeuge über deren Typprüfwerte (reale TTW-Anteile)

Bei der Betrachtung der WTW-Gesamtkette werden jetzt im ersten Schritt reale TTW-Unterschiede zum „chemisch“ erwarteten Wert durch eine Analyse der realen Typprüfwerte von Gasfahrzeugen analysiert. In der Praxis existieren weitere Einflüsse, die die Menge der realen TTW- und damit auch die WTW-Emissionen beeinflussen:

1. Gas brennt mit einer anderen Brenngeschwindigkeit. Z.B. wird bei der Verbrennung von LPG eine schnellere Verbrennung als bei Benzin beobachtet, die über eine Gleichraumverschiebung des motorischen Kreisprozesses zu einem höheren Wirkungsgrad führt.

2. Eine CNG-Ausstattung ist insbesondere wegen den dickwandigen Hochdruck-Tankzylinder relativ schwer. Das Mehrgewicht führt zu erhöhten Fahraufwänden im Vergleich zu einem entsprechenden Benzinfahrzeug.
3. Aufgrund der höheren Klopfestigkeit von CNG u. LPG können über Anpassungen von Verdichtung u. Zündzeitpunkt weitere Steigerungen des motorischen Wirkungsgrads sowohl für CNG wie auch LPG erzielt werden.

Die realen homologierten Typprüfwerte zeigen inwieweit beim jeweiligen Gasfahrzeug entsprechende Einflüsse berücksichtigt werden müssen.

### **CO<sub>2</sub>-Einsparungen von CNG-Neufahrzeugen bei 63% der Fahrzeuge geringer als „chemisch“ erwartet**

Tabelle 5 zeigt eine Aufstellung der TTW-Anteile mit realen Typprüfwerten über CO<sub>2</sub>-Emissionen von CNG-Fahrzeugen aus Neufahrzeug-Vergleichsdaten für Endverbraucher entsprechend DAT (7). Die genannten Fahrzeuge wurden mit einem vergleichbaren (monovalenten) Benzinfahrzeug verglichen.

Die Praxis zeigt, dass bei einem Vergleich mit einem entsprechenden Benziner immer noch 63% der CNG-Neufahrzeuge aus dem DAT-Leifaden nicht den „chemisch“ erwarteten Wert von 19,4% CO<sub>2</sub>-Einsparungen erreichen. Einer der Hauptgründe hierfür liegt offensichtlich in dem deutlich höheren Fahrzeuggewicht der CNG-Variante.

Neuere Fahrzeuge die speziell für den Betrieb mit CNG entwickelt wurden, erreichen jedoch mittlerweile in der Spitze einen um ca. 1% bessere CO<sub>2</sub>-Einsparung als bei Benzin äquivalentem Wirkungsgrad erwartet. So erreicht der CNG VW-Passat EcoFuel 20,1% CO<sub>2</sub>-Einsparungen. Daraus ergibt sich in der Gesamtbetrachtung für alle CNG Fahrzeuge noch ein Mittelwert von 18,0%.

Hersteller	Modell	Version	Hubraum [ccm]	Leistung [kW]	Getriebe	Kraftstoff	CO <sub>2</sub> Emissionen [g/km]	CO <sub>2</sub> Einsparung CNG
FIAT	Punto	1.4 8V S&S	1368	57	M5	Benzin	132	12,9%
		1.4 Natural Power (CNG)	1368	51	M5	CNG	115	
		1.4 Natural Power	1368	57	M5	Benzin	149	
		1.4 8V S&S (5 Türen)	1368	57	M5	Benzin	132	12,9%
		1.4 Natural Power (CNG) (5 Türen)	1368	51	M5	CNG	115	
		1.4 Natural Power (5 Türen)	1368	57	M5	Benzin	149	
	Doblo	1.4 16V T-Jet	1368	88	M6	Benzin	169	20,7%
		1.4 16V T-Jet Natural Power (CNG)	1368	88	M6	CNG	134	
		1.4 16V T-Jet Natural Power (CNG)	1368	88	M6	Benzin	173	
FIAT PROFESSIONAL	Doblo Cargo	Kombi Basis/SX 1.4 BZ E5	1368	70	M5	Benzin	166	19,3%
		Kombi Basis/SX 1.4 T-Jet / CNG E5	1368	88	M6	CNG	134	
		Kombi Basis/SX 1.4 T-Jet / CNG E5	1368	88	M6	Benzin	173	
	Fiorino	Kombi Basis/SX 1.4 BZ E5	1360	54	M5	Benzin	152	25,0%
		Kombi Basis/SX 1.4 Benzin/CNG E5	1368	57	M5	CNG	114	
		Kombi Basis/SX 1.4 Benzin/CNG E5	1368	51	M5	Benzin	152	
OPEL	Combo D (5 Sitze)	1.4 L1/H1 (Stop/Start)	1368	70	M5	Benzin	166	19,3%
		1.4 CNG	1368	88	M6	CNG	134	
		1.4 CNG	1368	88	M6	Benzin	173	
	Zafira	1.6	1598	103	M5	Benzin	168	17,3%
		1.6 CNG	1598	110	M6	CNG	139	
	Zafira C (5 Sitze)	1.4 (Stop/Start)	1362	103	M6	Benzin	148	12,8%
		1.6 CNG	1598	110	M6	CNG	129	
	Zafira C (7 Sitze)	1.4 (Stop/Start)	1362	103	M6	Benzin	148	12,8%
		1.6 CNG	1598	110	M6	CNG	129	

Tabelle 5, TTW-Anteil, reale Typrüfwerte zu CO<sub>2</sub>-Emissionen von CNG-Fahrzeugen

Hersteller	Modell	Version	Hubraum [ccm]	Leistung [kW]	Getriebe	Kraftstoff	CO <sub>2</sub> Emissionen [g/km]	CO <sub>2</sub> Einsparung CNG
VOLKSWAGEN	Touran	1.4 TSI	1390	103	M6	Benzin	159	19,5%
		1.4 TSI EcoFuel	1390	110	M6	CNG	128	
		1.4 TSI	1390	103	DSG7	Benzin	154	18,8%
		1.4 TSI EcoFuel	1390	110	DSG7	CNG	125	
		Cross Touran 1.4 TSI 5-Sitze	1390	103	M6	Benzin	168	19,0%
		Cross Touran 1.4 TSI EcoFuel 5-Sitze	1390	110	M6	CNG	136	
		Cross Touran 1.4 TSI 7-Sitze	1390	103	M6	Benzin	168	19,0%
		Cross Touran 1.4 TSI EcoFuel 7-Sitze	1390	110	M6	CNG	136	
		Cross Touran 1.4 TSI 5-Sitze	1390	103	DSG7	Benzin	164	18,9%
		Cross Touran 1.4 TSI EcoFuel 5-Sitze	1390	110	DSG7	CNG	133	
		Cross Touran 1.4 TSI 7-Sitze	1390	103	DSG7	Benzin	164	18,9%
		Cross Touran 1.4 TSI EcoFuel 7-Sitze	1390	110	DSG7	CNG	133	
	Passat Limousine	1.4 TSI	1390	90	M6	Benzin	145	19,3%
		1.4 TSI EcoFuel	1390	110	M6	CNG	117	
		1.4 TSI EcoFuel	1390	110	M6	Benzin	157	
	Passat Variant	1.4 TSI	1390	90	M6	Benzin	149	20,1%
		1.4 TSI EcoFuel	1390	110	M6	CNG	119	
		1.4 TSI EcoFuel	1390	110	M6	Benzin	161	
<b>mittlere CO<sub>2</sub> Einsparung 18,0%</b>								

- 1) Getriebe: M5 = Schaltgetriebe (5 Gänge), M6= Schaltgetriebe (6 Gänge), CVT = Stufenloses Getriebe, DSG7= Direktschaltgetriebe (7 Gänge)  
2) Fahrzeuge mit negativer CO<sub>2</sub>-Einsparung (wie z.B. VW-Caddy) sind auf von Grund technisch nicht vergleichbaren Benzinvarianten entfallen

Hersteller	Modell	Version	Hubraum [ccm]	Leistung [kW]	Getriebe	Kraftstoff	CO <sub>2</sub> Emissionen [g/km]	CO <sub>2</sub> Einsparung LPG
AVTOVAZ (RUS)	LADA 4x4	212140Y	1690	61	M5	Benzin	225	9,8%
		212140Y, Bivalent	1690	58	M5	LPG	203	
	LADA Priora 2171	217130Y	1596	72	M5	Benzin	150	10,0%
		217130Y, Bivalent	1596	69	M5	LPG	135	
	LADA Priora 2172	217230Y	1596	72	M5	Benzin	150	10,0%
		217230Y, Bivalent	1596	69	M5	LPG	135	
	LADA Kalina 1117	111740Y	1390	66	M5	Benzin	149	10,1%
		111740Y, Bivalent	1390	63	M5	LPG	134	
LADA Kalina 1119	111940Y	1390	66	M5	Benzin	149	10,1%	
	111940Y, Bivalent	1390	63	M5	LPG	134		
CHEVROLET	Spark	1.0 with ESC	995	50	M5	Benzin	118	6,8%
		1.0 EcoLogic	995	50	M5	LPG	110	
		1.2 with ESC	1206	60	M5	Benzin	118	4,2%
		1.2 EcoLogic	1206	58	M5	LPG	113	
DACIA	Sandero	1.2 16V 75	1149	55	M5	Benzin	135	9,6%
		1.2 16V LPG 75	1149	53	M5	LPG	122	
	Sandero Stepway II	1.6 MPI 85	1598	62	M5	Benzin	160	3,8%
		1.6 MPI LPG 85	1598	60	M5	LPG	154	
	Logan MCV	1.6 MPI 85	1598	62	M5	Benzin	169	11,8%
		1.6 MPI LPG 85	1598	60	M5	LPG	149	
	Duster	1.6 16V 105 4x2	1598	77	M5	Benzin	165	11,5%
		1.6 16V LPG 105 4x2	1598	75	M5	LPG	146	
FORD	Fiesta	1.4 Limousine 3 Türen	1388	71	M5	Benzin	130	12,3%
		1.4 Limousine 3 Türen LPG	1388	71	M5	LPG	114	
		1.4 Limousine 5 Türen	1388	71	M5	Benzin	130	12,3%
		1.4 Limousine 5 Türen LPG	1388	71	M5	LPG	114	
	Focus	1.6 Limousine 5 Türen	1596	92	M5	Benzin	136	4,4%
		1.6 Limousine 5 Türen LPG	1596	86	M5	LPG	130	
		1.6 Turnier	1596	92	M5	Benzin	139	6,5%
		1.6 Turnier LPG	1596	86	M5	LPG	130	
C-MAX	1.6 Kompaktvan	1596	92	M5	Benzin	154	15,6%	
	1.6 Kompaktvan LPG	1596	86	M5	LPG	130		

Tabelle 6, TTW-Anteil, reale Typrüfwerte zu CO<sub>2</sub>-Emissionen von LPG-Fahrzeugen

Hersteller	Modell	Version	Hubraum [ccm]	Leistung [kW]	Getriebe	Kraftstoff	CO <sub>2</sub> Emissionen [g/km]	CO <sub>2</sub> Einsparung LPG
HYUNDAI	i10 (PA)	1.1	1086	51	M5	Benzin	110	14,5%
		1.1 LPG	1086	50	M5	LPG	94	
		1.1	1086	51	A4	Benzin	134	14,9%
		1.1 LPG	1086	50	A4	LPG	114	
		1.2	1248	63	M5	Benzin	108	14,8%
		1.2 LPG	1248	62	M5	LPG	92	
		1.2	1248	63	A4	Benzin	129	14,7%
		1.2 LPG	1248	62	A4	LPG	110	
	i20 (PB, PBT)	1.2	1248	57	M5	Benzin	119	15,1%
		1.2 LPG	1248	56	M5	LPG	101	
		1.4	1396	74	M5	Benzin	136	14,7%
		1.4 LPG	1396	73	M5	LPG	116	
		1.4	1396	74	A4	Benzin	140	15,0%
		1.4 LPG	1396	73	A4	LPG	119	
	i30 (FD, FDH)	1.4	1396	80	M5	Benzin	142	14,8%
		1.4 LPG	1396	78	M5	LPG	121	
		blue 1.4	1396	80	M5	Benzin	135	14,8%
		blue 1.4 LPG	1396	78	M5	LPG	115	
		1.6	1591	93	M5	Benzin	152	15,1%
		1.6 LPG	1591	91	M5	LPG	129	
		1.6	1591	93	A4	Benzin	162	14,8%
		1.6 LPG	1591	91	A4	LPG	138	
		blue 1.6	1591	93	M5	Benzin	139	15,1%
		blue 1.6 LPG	1591	91	M5	LPG	118	
	i30cw (FD, FDH)	1.4	1396	80	M5	Benzin	147	15,0%
		1.4 LPG	1396	78	M5	LPG	125	
		blue 1.4	1396	80	M5	Benzin	138	15,2%
		blue 1.4 LPG	1396	78	M5	LPG	117	
		1.6	1591	93	M5	Benzin	152	15,1%
		1.6 LPG	1591	91	M5	LPG	129	
		1.6	1591	93	A4	Benzin	162	14,8%
		1.6 LPG	1591	91	A4	LPG	138	

Tabelle 6, TTW-Anteil, reale Typrüfwerte zu CO<sub>2</sub>-Emissionen von LPG-Fahrzeugen

Hersteller	Modell	Version	Hubraum [ccm]	Leistung [kW]	Getriebe	Kraftstoff	CO <sub>2</sub> Emissionen [g/km]	CO <sub>2</sub> Einsparung LPG
HYUNDAI	i30cw (FD, FDH)	blue 1.6	1591	93	M5	Benzin	142	14,8%
		blue 1.6 LPG	1591	91	M5	LPG	121	
	i40cw (VF)	1.6 GDI	1591	99	M6	Benzin	149	14,8%
		1.6 LPG	1591	97	M6	LPG	127	
		2.0 GDI	1999	130	M6	Benzin	159	9,4%
		2.0 LPG	1999	127	M6	LPG	144	
		2.0 GDI	1999	130	A6	Benzin	176	13,6%
		2.0 LPG	1999	127	A6	LPG	152	
	Genesis Coupe (BK)	2.0T	1998	154	M6	Benzin	220	15,0%
		2.0T LPG	1998	154	M6	LPG	187	
		3.8 V6	3778	223	M6	Benzin	246	15,0%
		3.8 V6 LPG	3778	219	M6	LPG	209	
		3.8 V6	3778	223	A6	Benzin	246	18,7%
	3.8 V6 LPG	3788	219	A6	LPG	200		
	Veloster (FS)	1.6 GDI	1591	103	M6	Benzin	148	14,9%
		1.6 GDI LPG	1591	101	M6	LPG	126	
		1.6 GDI	1591	103	DSG6	Benzin	145	15,2%
		1.6 GDI LPG	1591	101	DSG6	LPG	123	
		blue 1.6 GDI	1591	103	M6	Benzin	137	15,3%
		blue 1.6 GDI LPG	1591	101	M6	LPG	116	
	ix20 (JC)	1.4	1396	66	M5	Benzin	140	15,0%
		1.4 LPG	1396	65	M5	LPG	119	
		blue 1.4	1396	66	M5	Benzin	130	14,6%
blue 1.4 LPG		1396	65	M5	LPG	111		
1.6		1591	92	M6	Benzin	148	14,9%	
1.6 LPG		1591	90	M6	LPG	126		
1.6		1591	92	A4	Benzin	154	14,9%	
1.6 LPG		1591	90	A4	LPG	131		
blue 1.6		1591	92	M6	Benzin	139	15,1%	
blue 1.6 LPG		1591	90	M6	LPG	118		

Tabelle 6, TTW-Anteil, reale Typrüfwerte zu CO<sub>2</sub>-Emissionen von LPG-Fahrzeugen

Hersteller	Modell	Version	Hubraum [ccm]	Leistung [kW]	Getriebe	Kraftstoff	CO <sub>2</sub> Emissionen [g/km]	CO <sub>2</sub> Einsparung LPG
HYUNDAI	ix35 (EL, ELH)	1.6 2WD	1591	99	M6	Benzin	158	15,2%
		1.6 2WD LPG	1591	97	M6	LPG	134	
		blue 1.6 2WD	1591	99	M6	Benzin	149	14,8%
		blue 1.6 2WD LPG	1591	97	M6	LPG	127	
		2.0 2WD	1998	120	M5	Benzin	177	15,3%
		2.0 2WD LPG	1998	118	M5	LPG	150	
		2.0 2WD	1998	120	A6	Benzin	187	15,0%
		2.0 2WD LPG	1998	118	A6	LPG	159	
		2.0 4WD	1998	120	M5	Benzin	188	14,9%
		2.0 4WD LPG	1998	118	M5	LPG	160	
		2.0 4WD	1998	120	A6	Benzin	200	15,0%
		2.0 4WD LPG	1998	118	A6	LPG	170	
	Santa Fe (CM)	2.4 2WD (5 Sitze)	2359	128	M6	Benzin	203	14,8%
		2.4 2WD (5 Sitze) LPG	2359	125	M6	LPG	173	
		2.4 4WD (5 Sitze)	2359	128	M6	Benzin	208	14,9%
		2.4 4WD (5 Sitze) LPG	2359	125	M6	LPG	177	
		2.4 4WD (5 Sitze)	2359	128	A6	Benzin	210	14,8%
		2.4 4WD (5 Sitze) LPG	2359	125	A6	LPG	179	

Tabelle 6, TTW-Anteil, reale Typrüfwerte zu CO<sub>2</sub>-Emissionen von LPG-Fahrzeugen

Hersteller	Modell	Version	Hubraum [ccm]	Leistung [kW]	Getriebe	Kraftstoff	CO <sub>2</sub> Emissionen [g/km]	CO <sub>2</sub> Einsparung LPG
OPEL	Corsa	1.2 ecoFLEX (Stop/Start)	1229	63	M5	Benzin	121	9,1%
		1.2 LPG 2 Türen	1229	61	M5	LPG	110	
		1.2 ecoFLEX (Stop/Start)	1229	63	M5	Benzin	121	5,0%
		1.2 LPG 4 Türen	1229	61	M5	LPG	115	
	Meriva B	1.4 Stop/Start	1362	88	M5	Benzin	132	6,1%
		1.4 LPG	1362	88	M5	LPG	124	
	Astra - J	1.4	1362	103	M6	Benzin	159	15,1%
		1.4 LPG	1362	103	M6	LPG	135	
Astra Sports Tourer	1.4	1362	103	M6	Benzin	149	6,7%	
	1.4 LPG	1362	103	M6	LPG	139		
SEAT	Ibiza / Ibiza SC	1.4	1390	63	M5	Benzin	139	11,5%
		1.6 LPG	1598	60	M5	LPG	123	
SKODA	Octavia Limousine	1.6	1595	75	M5	Benzin	166	10,2%
		1.6 LPG	1595	72	M5	LPG	149	
	Octavia Combi	1.6	1595	75	M5	Benzin	168	11,3%
		1.6 LPG	1595	72	M5	LPG	149	
VOLKSWAGEN	Polo	1.4	1390	63	M5	Benzin	139	11,5%
		1.6 BiFuel	1598	60	M5	LPG	123	
<b>mittlere CO<sub>2</sub> Einsparung 12,8%</b>								

- 1) Getriebe: M5 = Schaltgetriebe (5 Gänge), M6= Schaltgetriebe (6 Gänge), CVT = Stufenloses Getriebe, DSG7= Direktschaltgetriebe (7 Gänge)  
2) Fahrzeuge mit negativer CO<sub>2</sub>-Einsparung (wie z.B. VW-Caddy) sind auf von Grund technisch nicht vergleichbaren Benzinvarianten entfallen

Tabelle 6 zeigt entsprechend DAT (7) und für LPG-Fahrzeuge aus Neufahrzeug-Vergleichsdaten eine Aufstellung der TTW-Anteile anhand von realen Typprüfwerten über CO<sub>2</sub>-Emissionen. Auch hier wurden die Fahrzeuge mit einem gleichen monovalenten Benzinfahrzeug verglichen.

Aus den Homologationsdaten von LPG Fahrzeugen lässt sich ableiten, dass im Schnitt beim Vergleich mit einem entsprechenden Benziner eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von 12,8% erreicht wird. Damit liegt der Mittelwert des realen CO<sub>2</sub>-Vorteils von LPG Fahrzeugen um ca. +3,2% über dem erwarteten Wert von 9,2% bei Benzin äquivalentem Wirkungsgrad. Der hier festgestellte günstigere CO<sub>2</sub>-Vorteil bei LPG Fahrzeugen kann unter anderem mit der bereits erwähnten Gleichraumverschiebung des motorischen Kreisprozesses bei der LPG-Verbrennung erklärt werden. Weitere wirkungsgradsteigernde Maßnahmen, wie eine Zündzeitpunktanpassung oder Änderung der motorischen Verdichtung, können sicherlich an dieser Stelle ausgeschlossen werden, da die LPG-Fahrzeuge in der Regel bivalent ausgelegt werden.

Im nächsten Bearbeitungsschritt werden in die WTW-Kette die sich aus den Typprüfwerten ergebenden Anpassungen eingearbeitet, wie folgende Tabelle zeigt:

		LPG	CNG	CNG vs LPG	Quelle / Hinweis
1	<b>theoret. TTW-Vorteil chemisch</b>	9,2%	19,4%	10,2%	
2	<b>WTW</b>	<b>13,2%</b>	<b>14,2%</b>	<b>1,1%</b>	
<b>Berücksichtigung realer Wirkungsgrad durch Fahrzeug-Homologationswerte entsprechend DAT Q2/2012</b>					
3	<b>Reale TTW-Vorteile aus CO<sub>2</sub> Reduktion laut Homologation</b>	<b>12,8%</b>	<b>18,0%</b>	<b>5,2%</b>	entsprechend Typprüfwerte aus DAT Q2/2012
4	<b>aus Typprüfwerten abgeleitete Minderverbräuche bzw. Wirkungsgradvorteile</b>	<b>3,2%</b>	<b>-1,2%</b>	<b>-4,4%</b>	
5	<b>WTW-Vorteil mit realem Wirkungsgrad</b>	<b>16,4%</b>	<b>13,0%</b>	<b>-3,4%</b>	

**Tabelle 7, Prozentuale Vorteile TTW und WTW beim Treibhausgasäquivalent von LPG und CNG gegenüber Benzin**

In Tabelle 7 sind alle bisher betrachteten prozentualen CO<sub>2</sub>-Vorteile gegenüber Benzinantrieb in einer Übersicht dargestellt. Zum Vergleich wurden in den Zeilen 1 u. 2. die Daten aus Tabelle 4 (chemisch basierend auf reinen Stoffwerten) in Prozentangaben umgerechnet.

Weiterhin zeigt die Tabelle die Berücksichtigung der realen Fahrzeug-Typprüfwerte. Die prozentualen Minderverbräuche bzw. Wirkungsgradvorteile in Zeile 4 wurden über einen Dreisatz aus den Differenzen bei der TTW- CO<sub>2</sub> Einsparung errechnet zwischen

- dem theoretischen, „chemischen“ TTW-Vorteil (Zeile 1) und
- dem TTW-Vorteil basierend auf der Abgasmessung bei der Homologation (Zeile 3).

Die bestimmten Werte werden direkt als Korrektur des theoretischen vollständigen WTW-Vorteils addiert (Zeile 2 + Zeile 4), da Minderverbräuche weniger CO<sub>2</sub>-Ausstoß sowohl bei der Bereitstellung wie auch beim Fahren zur Folge haben. Daraus erhält man die WTW-Vorteile unter Berücksichtigung realer Typprüfwerte, s. Zeile 5.

Vergleicht man jetzt die beiden Gasvarianten in Tabelle 7, Zeile 5 miteinander, so steht das LPG-betriebene Fahrzeug etwas vorteilhafter da. Offensichtlich wurde der signifikante „chemische“ Vorteil von CNG (besseres H/C-Verhältnis) vollständig durch Nachteile bei der Bereitstellung und durch erhöhte Fahrwiderstände durch höheres Fahrzeuggewicht aufgezehrt, siehe hierzu auch Kapitel 4.

Im nächsten Schritt werden die korrigierten prozentualen Vorteile wieder auf die „chemischen“, Energie-spezifischen Treibhausgasäquivalente angewandt. Damit sieht die korrigierte Ergebnistabelle wie folgt aus:

g CO <sub>2</sub> /MJ	Benzin	LPG	CNG	Benzin vs LPG	CNG vs LPG	Quelle / Hinweis
<b>WTT</b> Bereitstellungsaufwand bis in den Fahrzeugtank	12,5	8,0	14,5	-4,5	-6,5	JRC, EUCAR, GONCAWE WELL-TO-TANK Report, App. 2 Vers. 3.0 November 2008 4000km
<b>TTW</b> Verbrennung	72,5	63,1	59,4	-9,4	3,7	abgeleitet aus Kraftfahrtech. Taschenbuch, Bosch, mit Korrektur aus Typprüfwerten
<b>WTW</b> Bereitstellung + Verbrennung	<b>85,0</b>	<b>71,1</b>	<b>73,9</b>	<b>-13,9</b>	<b>-2,8</b>	

**Tabelle 8, Energiemengen bezogenes Treibhausgasäquivalent WTT, TTW u. WTW-Werte in g CO<sub>2</sub>/MJ unter Berücksichtigung von gemittelten Typprüfwerten**

Legt man jetzt das gleiche Modellfahrzeug zugrunde wie bei JEC (2) mit 193 MJ/100km, so können die berechneten Treibhausgasäquivalente in g CO<sub>2</sub>/km umgerechnet werden, siehe folgende Tabelle bzw. Abbildung 3.

g CO <sub>2</sub> /km	Benzin	LPG	CNG	Benzin vs LPG	CNG vs LPG	Quelle / Hinweis
<b>WTT Bereitstellungsaufwand bis in den Fahrzeugtank</b>	24,1	15,4	28,0	-8,7	-12,5	JRC, EUCAR, CONCAWE WELL-TO-TANK Report, App. 2 Vers. 3.0 November 2008 4000km
<b>TTW Verbrennung</b>	139,9	121,8	114,7	-18,1	7,1	abgeleitet aus Krafftahrtech. Taschenbuch, Bosch, mit Korrektur aus Typprüfwerten
<b>WTW Bereitstellung + Verbrennung</b>	<b>164,0</b>	<b>137,2</b>	<b>142,7</b>	<b>-26,8</b>	<b>-5,5</b>	

**Tabelle 9, Fahrstrecken bezogenes Treibhausgasäquivalent WTT, TTW u. WTW-Werte in g CO<sub>2</sub>/km unter Berücksichtigung von gemittelten Fahrzeug-Typprüfwerten.**

**Umrechnungsschlüssel entsprechend JEC-Modellfahrzeug mit 193 MJ/100km**

Somit spart ein mittleres LPG-Fahrzeug entsprechend den vorhergehenden Betrachtungen in der ganzen WTW-Kette relativ zum Betrieb mit Benzin 26,8 g CO<sub>2</sub>/km ein. Selbst relativ zu einem CNG-Fahrzeug (das mit CNG betrieben wird, das über 4000km bereitgestellt wurde) liegt das LPG-Fahrzeug um 5,5 g CO<sub>2</sub>/ km günstiger.

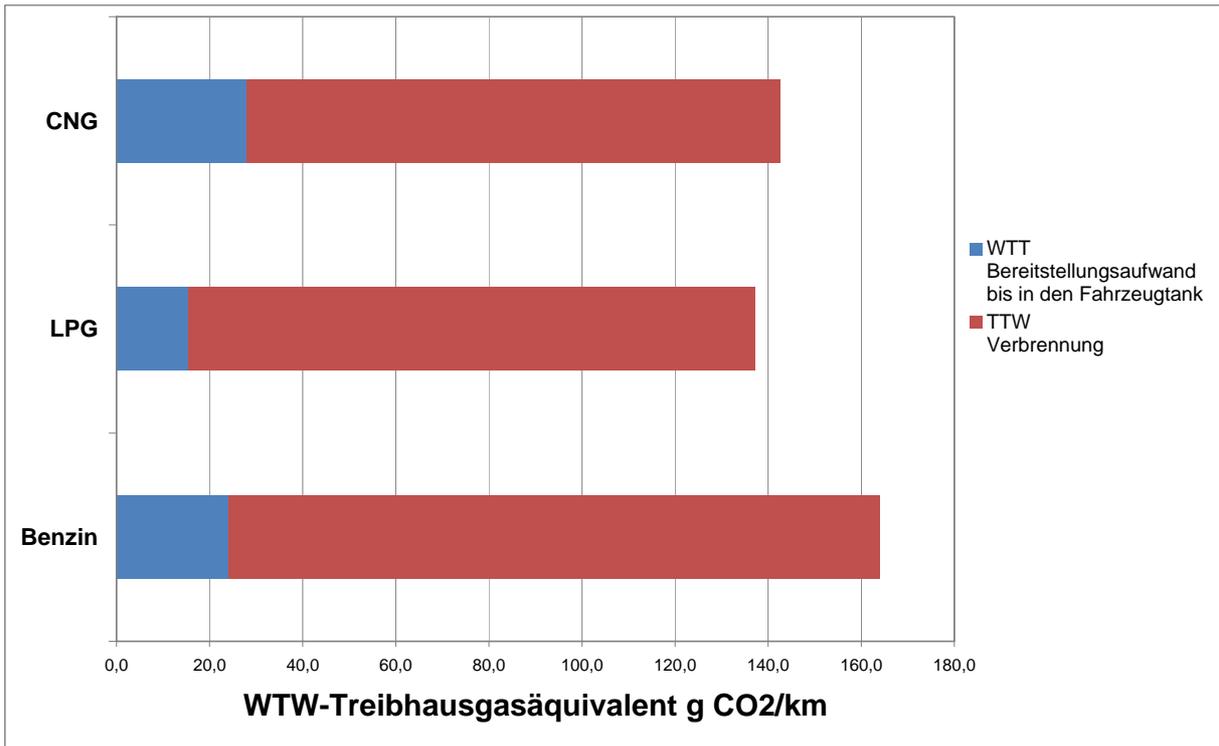


Abbildung 3, Fahrstrecken bezogenes Treibhausgasäquivalent in g CO<sub>2</sub>/km unter Berücksichtigung von gemittelten Fahrzeug-Typprüfwerten

Nachdem das Berechnungsmodell jetzt vollständig auf durchschnittliche Fahrzeuge kalibriert ist, kann ergänzend zu den bisherigen Betrachtungen für den CNG-Betrieb die Abhängigkeit von der Länge des Bereitstellungswegs basierend auf den JEC Daten (2) ermittelt werden:

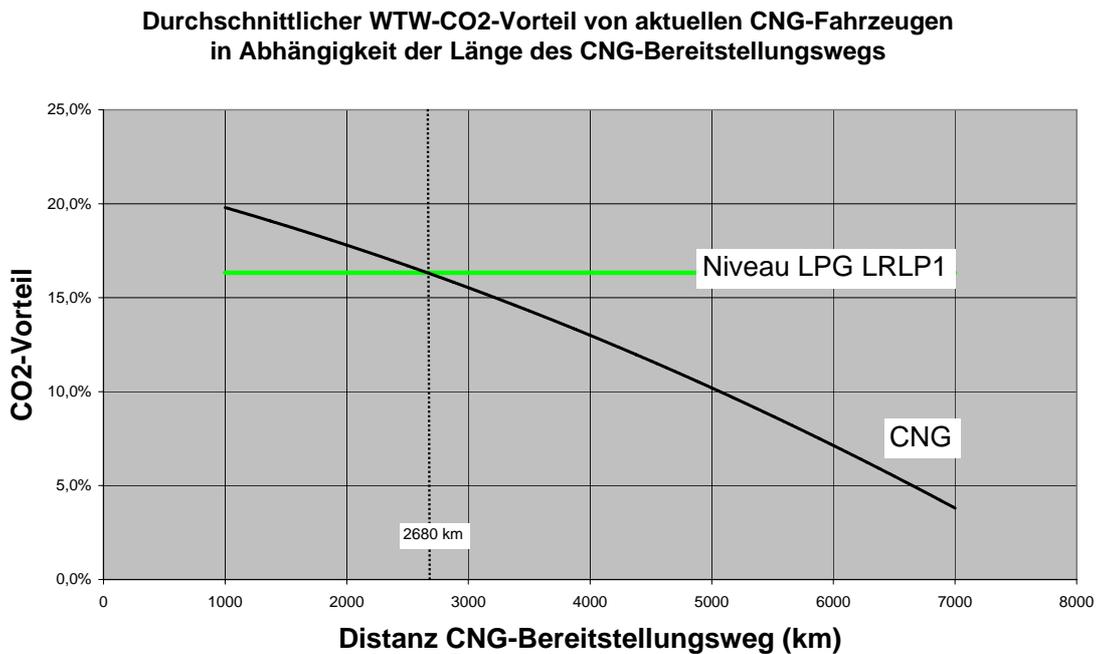


Abbildung 4, WTW- CO<sub>2</sub>-Vorteil bei CNG-Betrieb in Abhängigkeit vom Bereitstellungsweg

Die grüne Linie in Abbildung 4 zeigt das WTW- CO<sub>2</sub> Einsparungsniveau eines durchschnittlichen aktuellen LPG-Fahrzeugs. Der Schnittpunkt beider Linien, also die gleiche CO<sub>2</sub>-Einsparung „break even“ für beide Gasarten, liegt bei 2680 km Distanz für die CNG-Bereitstellung.

## 5 Erhöhung der Fahrwiderstände durch erhöhtes Fahrzeuggewicht von Gasfahrzeugen

*(dieser Abschnitt konnte nicht von DAT Q3-2010 auf DAT Q2-2012 aktualisiert werden, da die Q2-2012 Daten teilweise Fehler bei den Gewichtsangaben oder nicht vergleichbare Motoren bzw. Getriebe enthielten)*

Im vorhergehenden Kapitel wurde die Annahme ausgesprochen, dass bei CNG-Fahrzeugen durch erhöhtes Fahrzeuggewicht ein signifikanter Teil der CO<sub>2</sub>-Vorteile der Verbrennung verloren geht. Um diese zu prüfen, wurden für den überwiegenden Teil der bisher betrachteten Fahrzeuge die Fahrzeugmassen ermittelt und in der folgenden Tabelle eingetragen. Zusätzlich wurden CO<sub>2</sub>-Nachteile (Mehrverbräuche) ausgewiesen, die aus dem Vergleich ermittelt wurden von

- CNG-Fahrzeug im Benzinbetrieb
- relativ zu einem gleichwertigen (monovalenten) Benzinfahrzeug

Hersteller	Modell	Version	Hubraum ccm	Leistung kW	Leergewicht in kg	Gew. der Gasanlage in kg	Getriebe	Kraftstoff	CO <sub>2</sub> Emissionen g/km	CO <sub>2</sub> Mehrverbrauch	Quelle
Fiat	Panda	1.2 8V	1242	44	940		M5	Super	119	22,7%	DAT 3/2010
		1.2 Natural Power i. Benzinbetrieb	1242	44	1125	185	M5	Super	146		DAT 3/2010
Fiat	Dobolo	1.4 8V	1368	57			M5	Super	168	29,8%	DAT 3/2010
		1.6 Natural Power i. Benzinbetrieb	1596	68			M5	Super	218		DAT 3/2010
FORD	Focus	1.8 Limousine 3-/5-türig/Turnier	1798	92			M5	Super	167	1,2%	DAT 3/2010
		2.0 CNG i. Benzinbetrieb	1999	93			M5	Super	169		erdgas mobil
FORD	C-Max	1.8 Kompaktvan	1798	92			M5	Super	169	1,2%	DAT 3/2010
		2.0 CNG i. Benzinbetrieb	1999	93			M5	Super	171		erdgas mobil
Mercedes-Benz	B-Klasse	B 200	2034	100	1345		M5	Super	164	6,7%	DAT 3/2010
		B 180 NGT BlueE i. Benzinbetrieb	2034	85	1470	125	M5	Super	175		erdgas mobil
Mercedes-Benz	B-Klasse	B 200	2034	100	1345		CVT	Super	180	0,6%	DAT 3/2010
		B 180 NGT BlueE i. Benzinbetrieb	2034	85	1470	125	CVT	Super	181		Mercedes.de
Opel	Combo	1.4 TWINPORT	1364	66			M5	Super	153	2,0%	DAT 3/2010
		1.6 CNG i. Benzinbetrieb	1598	69			M5	Super	156		erdgas mobil
Opel	Zafira	1.6	1598	85	1505		M5	Super	159	N/A	DAT 3/2010
		1.6 CNG	1598	69	1655	150	M5	CNG	N/A		DAT 3/2010
Opel	Zafira	1.6	1598	85	1505		M5	Super	169	N/A	DAT 3/2010
		1.6 CNG	1598	110	1655	150	M6	CNG	N/A		DAT 3/2010
Volkswagen	Touran	1.4 TSI	1390	103	1523		M6	Super	166	N/A	DAT 3/2010
		1.4 TSI EcoFuel	1390	110	1682	159	M6	CNG	N/A		DAT 3/2010
Volkswagen	Touran	1.4 TSI	1390	125	1523		DSG7	Super	159	N/A	DAT 3/2010
		1.4 TSI EcoFuel	1390	110	1682	159	DSG7	CNG	N/A		DAT 3/2010
Volkswagen	Touran	CrossTouran 1.4 TSI	1390	103	1586		M6	Super	169	N/A	DAT 3/2010
		CrossTouran 1.4 TSI EcoFuel	1390	110	1749	163	M6	CNG	N/A		DAT 3/2010
Volkswagen	Touran	CrossTouran 1.4 TSI	1390	103	1607		DSG7	Super	163	N/A	DAT 3/2010
		CrossTouran 1.4 TSI EcoFuel	1390	110	1750	143	DSG7	CNG	N/A		DAT 3/2010
Volkswagen	Passat Limousine	1.4 TSI	1390	90	1463		M6	Super	157	5,7%	DAT 3/2010
		1.4 TSI EcoFuel i. Benzinbetrieb	1390	110	1602	139	M6	Super	166		Volkswagen.de
Volkswagen	Passat Limousine	1.4 TSI	1390	90	1485		DSG7	Super	152	3,3%	DAT 3/2010
		1.4 TSI EcoFuel i. Benzinbetrieb	1390	110	1621	136	DSG7	Super	157		DAT 3/2010
<b>Mittelwerte:</b>						<b>149</b>				<b>8,1%</b>	

**Tabelle 10, Fahrzeugvergleich CNG vs. Benzin bezüglich a) Fahrzeuggewicht und b) CO<sub>2</sub>-Zusatzemission beim Betrieb eines bivalenten CNG-Fahrzeugs mit Benzin**

Die Mittelwerte aus Tabelle 10 weisen für CNG-Fahrzeuge ein durchschnittliches Mehrgewicht von 149 kg aus. Betreibt man ein bivalentes CNG-Fahrzeug nicht mit Gas sondern mit Benzin so emittiert dieses CNG-Fahrzeug durchschnittlich 8,1% mehr CO<sub>2</sub> als ein gleiches Fahrzeug, das nur monovalent auf Benzin ausgelegt wurde.

Eine einfache Plausibilitätsprüfung führt zu den gleichen Zahlen. Erfahrungswerte mit unterschiedlich schweren Fahrzeugen zeigen, dass ein Fahrzeugmehrgewicht von 100 kg zu einem Mehrverbrauch von ca. 0,5 l Benzin/100km führt (10) .

Geht man von einem durchschnittlichen Verbrauch der genannten Benzinfahrzeuge von 9 l/100km aus, so würden 149 kg zu einem Mehrverbrauch von ca. 0,75 l Benzin bzw. 8,3% führen. D.h. die Mittelwerte von Tabelle 10 korrelieren offensichtlich sehr gut mit dem genannten Erfahrungswert für den Zusammenhang zwischen Fahrzeuggewicht und Kraftstoffmehrverbrauch. Das Mehrgewicht auf Grund des Kraftstoffsystems führt nachweislich auch in den Typprüfwerten zu erhöhten Fahrwiderständen und damit zu Kraftstoff-Mehrverbräuchen, die entsprechend auch in einer korrekten und vollständigen WTW-Betrachtung einfließen müssen. Im Fall der LPG-Fahrzeuge sind den Autoren keine vergleichbaren Tabellen bekannt. Nach bisher vorliegenden Erfahrungen müssen wegen der deutlich leichteren Einbauten (50...70 kg gefüllt) alle genannten Zahlen halbiert bis gedrittelt werden.

Vergleicht man abschließend die hier genannten Mehrverbräuche mit den in Tabelle 7, Zeile 4 abgeschätzten Mehrverbräuchen, so findet man erstaunlicher Weise deutlich kleinere Werte. Die Autoren gehen an dieser Stelle davon aus, dass ein Teil der gewichtsbedingten Nachteile durch einen höheren motorischen Wirkungsgrad beim Gasbetrieb kompensiert werden. Beobachtungen eines schnelleren Brennverlaufs z.B. im Fall von LPG bestätigen diese Annahme.

## **6 Ausblick, CO<sub>2</sub>-Einspartpotential von Gasfahrzeugen**

Die beiden Gasarten CNG und LPG haben gegenüber Benzin eine deutlich erhöhte Klopfestigkeit. Damit besteht die Möglichkeit den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors durch eine Optimierung des Zündzeitpunkts und eine Erhöhung der motorischen Verdichtung zu verbessern. Zur Nutzung von diesem Potential müssten die Fahrzeuge spezifisch auf einen vorrangigen Betrieb mit der jeweiligen Gasart ausgelegt werden.

Volkswagen hat dies in einem Fall für ein CNG-Fahrzeug den Passat 1,4 TSI EcoFuel umgesetzt und erreicht damit einen CO<sub>2</sub>-Vorteil TTW 20,1% bzw. WTW 14,8% (statt genannte durchschnittlich TTW 18% bzw. WTW 13% der aktuell verfügbaren CNG-Neuwagen, Tabelle 7).

An der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Saarbrücken wurde im Rahmen des Projekts „CO<sub>2</sub>-100minus“ ein Peugeot 107 auf LPG umgerüstet und für den Betrieb mit LPG optimiert. Durch die optimale Anpassung an das motorische Potential von LPG konnte ein Spitzenwert von 90,9 g CO<sub>2</sub>/km d.h. TTW 17% bzw. WTW 20% CO<sub>2</sub>-Vorteil erreicht werden (vergl. aktueller LPG-Durchschnitt TTW 12,9% bzw. WTW 15,2%, Tabelle 7).

Diese Ergebnisse zeigen das bestehende Optimierungspotenzial, welches den Herstellern für künftige Fahrzeugentwicklungen zur Verfügung steht.

## 7 Zusammenfassung

Well-to-Wheel- (WTW-) Analysen der letzten Jahren weisen für Gasfahrzeuge CO<sub>2</sub>-Einsparungen von durchschnittlich mehr als 15% aus, wobei in den Analysen abhängig von den jeweiligen Annahmen große Streuungen gefunden wurden. Insbesondere hat der jeweilige Bereitstellungsaufwand bis zur Zapfsäule (WTT) einen großen Einfluss auf die WTW Summeneinsparung.

Tank-to-Wheel-Anteile (TTW), d.h. Anteile bei der Nutzung der Kraftstoffe können praxisnah aus den jeweiligen Stoffdaten der Kraftstoffe und den Typprüfwerten von realisierten Gasfahrzeugen ermittelt werden. Bei diesem Ansatz wird der „chemische“ Vorteil über das günstige H/C-Verhältnis unabhängig von der Wahl des Fahrzeugs als Basiswert verwendet und dieser über spezifische Einflüsse der realen Fahrwiderstände und der antriebsseitigen Wirkungsgrade basierend auf den Typprüfwerten korrigiert.

Bei CNG-betriebenen Fahrzeugen stellte sich heraus, dass ein großer Teil der angebotenen CNG-Neufahrzeuge die Erwartungen aus den chemischen Stoffdaten nicht erfüllt. Im Durchschnitt wird „chemisch“ TTW-anteilig ein CO<sub>2</sub>-Vorteil 19,4% erwartet, aber nur 18% bei den durchschnittlichen Typprüfwerten erreicht. Die Ursache hierfür liegt im Wesentlichen beim hohen Zusatzgewicht der Fahrzeuge auf Grund der relativ schweren CNG-Drucktanks. Die besten CNG-Modelle liegen mit einem Vorteil von 20,1% CO<sub>2</sub>-Einsparung über den

„chemischen Erwartungen“, da bei neueren Fahrzeugen offensichtlich das tatsächliche Wirkungsgradpotential von CNG besser genutzt wird und damit der Gewichtsnachteil sogar überkompensiert werden kann.

LPG-Fahrzeuge liegen bei den Typprüfwerten mit durchschnittlich 12,8% CO<sub>2</sub>-Vorteil TTW in der Regel über den „chemischen Erwartungen“ von nur 9,2%. Offensichtlich wird bei LPG-Fahrzeugen der Nachteil des Mehrgewichts, der bei der LPG-Ausrüstung nur ca. 1/3 des Gewichts der CNG-Ausrüstung ist, im Durchschnitt immer von den besseren Brenneigenschaften des LPG überkompensiert, auch ohne dass gesonderte Wirkungsgradsteigernde Maßnahmen vorgenommen werden müssen.

Vergleicht man die Gasantriebsarten CNG u. LPG in der WTW-Kette, so weist dieser Bericht für CNG 13,0% und für LPG 16,4% CO<sub>2</sub>-Einsparung aus. Im Fall von CNG variiert der genannte Wert stark mit der jeweiligen Länge des Bereitstellungswegs. Gelingt es, CNG aus dem EU-Mix (1000 km) zu tanken, können im Durchschnitt 19,8% CO<sub>2</sub>-Vorteil erreicht werden. Geht man jedoch davon aus, dass die mobilen Kraftstoff-Mehrverbräuche aus weiter entfernten Quellen zugekauft werden müssen - z.B. mittlerer Bereitstellungsweg 4000 km - fällt beim CNG-Antrieb der Vorteil unter LPG-Niveau. Bei einem mittleren CNG-Bereitstellungsweg von 2680 km sind die CO<sub>2</sub>-Einsparungen beider Gasantriebsvarianten CNG und LPG für durchschnittliche Fahrzeuge identisch und liegen um ca. 27 g CO<sub>2</sub>/km günstiger als bei Benzinbetrieb.

Ein abschließender Gewichtsvergleich von CNG-Fahrzeugen mit gleichartigen monovalenten Benzinfahrzeugen weist ein durchschnittliches Mehrgewicht von ca. 150 kg für die CNG Ausrüstung aus. Betreibt man ein CNG-Fahrzeug nicht mit Gas sondern mit Benzin, so zeigen die verwendeten Typprüfwerte einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß, der um ca. 8% im Vergleich zum einfachen Benzinfahrzeug erhöht ist. Genannte Werte decken sich mit bekannten empirischen Erfahrungen der Verbraucherrhöhung durch Fahrzeuggewicht von ca. 0,5l Benzin/(100km\*100kg).

Einen Ausblick auf eine mögliche Entwicklung in der Zukunft geben vorrangig auf eine Gasart ausgelegte Gasfahrzeuge. Diese zeigen im Fall CNG, am VW Passat 1,4 TSI EcoFuel, 14,8% WTW CO<sub>2</sub>-Vorteil bei CNG, das über 4000 km an die Tanksäule gelangt und im Fall LPG an einem Versuchsfahrzeug der HTW-Saarbrücken 20% WTW CO<sub>2</sub>-Vorteil.

## 8 Literatur

- (1) Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study for General Motors 2002  
[http://www.lbst.de/ressources/studies\\_d.html](http://www.lbst.de/ressources/studies_d.html)
- (2) WELL-TO-WHEELS ANALYSIS OF FUTURE AUTOMOTIVE FUELS AND POWERTRAINS IN THE EUROPEAN CONTEXT, 10-2008,  
<http://ies.jrc.ec.europa.eu>
- (3) Bericht der Unterarbeitsgruppe Kraftstoffmix zum Matrixprozess 2004;  
[http://www.bmvbs.de/Anlage/original\\_22295/Matrixbericht-der-Expertenarbeitsgruppe-der-Bundesregierung.pdf](http://www.bmvbs.de/Anlage/original_22295/Matrixbericht-der-Expertenarbeitsgruppe-der-Bundesregierung.pdf), Seite 17
- (4) Gelbe Reihe BOSCH: Hybridantriebe, Brennstoffzellen und alternative Kraftstoffe, 2008, ISBN 9783865222770
- (5) <http://www.daimler.com/go/optiresource>
- (6) Ökopprofile von Treibstoffen, BUWAL, Bern 1998
- (7) Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen, 2-2012  
<http://www.dat.de/>
- (8) dena-Studie, Erdgas und Biomethan im künftigen Kraftstoffmix, 2010  
<http://www.dena.de/de/themen/thema-mobil/publikationen/publikation/erdgas-und-biomethan/>
- (9) Bosch Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, ISBN-10: 3528138769
- (10) "Umweltgerecht Auto fahren" von Knut Böttcher, Jürgen Sachse, Seite 116, ISBN 9783410168669
- (11) HTW des Saarlands, Forschungsgruppe Automotive Powertrain, Projekt „CO<sub>2</sub>-100minus“, <http://www.projekt-co2-100minus.de/>