



# **Abgastests unter realen Fahrbedingungen: Autogas-Pkw im Vergleich mit Benzin- und Diesel-Fahrzeugen**

PEMS-Untersuchungen  
an  
LPG- und konventionell betriebenen Pkw  
im  
Real-Driving-Emissions-Betrieb und im WLTC-Zyklus

Erstellt von:  
**Prof. Dr.-Ing. Thomas Heinze**  
und  
**Oliver Zemborski**  
im Auftrag des Deutschen Verbandes Flüssiggas e. V.  
**November 2016**

Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes  
Institut Automotive Powertrain  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Heinze  
Goebenstr. 40  
D-66117 Saarbrücken



# **Abgastests unter realen Fahrbedingungen: Autogas-Pkw im Vergleich mit Benzin- und Diesel-Fahrzeugen**

PEMS-Untersuchungen  
an  
LPG- und konventionell betriebenen Pkw  
im  
Real-Driving-Emissions-Betrieb und im WLTC-Zyklus



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>7</b>
<b>1 Projekt-/Aufgabenbeschreibung</b>	<b>8</b>
<b>2 Versuchsfahrzeuge</b>	<b>9</b>
<b>3 Messtechnik</b>	<b>10</b>
3.1 Abgasmesstechnik	10
3.2 Fahrwiderstands-Simulation (NEFZ, WLTC)	10
<b>4 Messprogramm</b>	<b>11</b>
4.1 Durchgeführte Messungen	11
4.2 RDE-Beschreibung	12
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>14</b>
5.1 Ergebnisse nach Fahrzeugen	16
5.1.1 Skoda Octavia 1.8 TFSI (DI: Benzin & LPG, PFI: Benzin)	16
5.1.2 Opel Astra 1.4 Eco-Flex & 1.6 CDTI (PFI: Benzin & LPG, DI: Diesel)	18
5.1.3 Kia Sportage 1.6 GDI (DI: Benzin & LPG)	21
5.2 Ergebnisvergleich nach Emissionen	25
5.2.1 Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	25
5.2.2 Partikel, Partikelanzahl (PN)	26
5.2.3 CO <sub>2</sub> -Einsparung	27
<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>28</b>

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1:	Streckenführung der RDE-Strecke	12
Abbildung 2:	Höhenprofil der RDE-Strecke	12
Abbildung 3:	Anforderungen an die Messstrecke	13
Abbildung 4:	RDE-Ergebnisse beider Kraftstoffe des Skoda Octavia	16
Abbildung 5:	WLTC-Ergebnisse beider Kraftstoffe des Skoda Octavia	17
Abbildung 6:	Ergebnisse der RDE-Fahrten des Opel Astra	18
Abbildung 7:	Ergebnisse der WLTC-Fahrten des Opel Astra	18
Abbildung 8:	Partikelverlauf ohne Regeneration	20
Abbildung 9:	Partikelverlauf mit Regeneration	20
Abbildung 10:	Vergleich der Partikelemissionen	21
Abbildung 11:	Kia Sportage Conformity Factors RDE	21
Abbildung 12:	Kia Sportage Conformity Factors RDE (vergrößerte Darstellung)	22
Abbildung 13:	Kia Sportage Conformity Factors WLTC	22
Abbildung 14:	Kia Sportage Conformity Factors WLTC (vergrößerte Darstellung)	23
Abbildung 15:	Kia Sportage CO-Emissionen CF RDE/WLTC/NEFZ	24
Abbildung 16:	Übersicht Stickoxide	25
Abbildung 17:	Partikelemissionen aller Fahrzeuge im Verhältnis zum Euro-6c-Grenzwert	26
Abbildung 18:	CO <sub>2</sub> -Einsparpotenziale	27

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsfahrzeuge	9
Tabelle 2: Übersicht der durchgeführten Messungen	11
Tabelle 3: Bezugsgrenzwerte für die CF-Berechnung	14
Tabelle 4: Gesamtübersicht der Ergebnisse	15





## Zusammenfassung

---

Die Untersuchung vergleicht Euro-5/Euro-6 (EU5/EU6) -Pkw im Betrieb mit Autogas, Benzin und Diesel. Die Tests erfolgten unter möglichst realitätsnahen Bedingungen bei realen Straßenfahrten im Real-Driving-Emissions (RDE)-Betrieb, bei Fahrzeugrollentests im Worldwide Harmonized Light-Duty Test Cycle (WLTC) und teilweise auch im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die gemessenen  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Dieselfahrzeugs Opel Astra 1.6 CDTi lagen im Durchschnitt aller Tests um einen Faktor 7 oberhalb des zulässigen Grenzwerts und um einen Faktor  $> 50$  höher als bei den Pkw mit Ottomotoren, sowohl im Autogas- als auch im Benzinbetrieb.
- Der LPG-Betrieb reduziert bei Ottomotoren den Partikelaustritt bezüglich der Partikelanzahl (PN) bei Saugrohr- und DI-Einspritzung um 90 - 99 Prozent (RDE und WLTC). Somit können durch den Betrieb mit Autogas insbesondere bei DI-Ottomotoren EU6c-PN-Grenzwerte sicher erreicht werden.
- Beim Diesel Opel Astra werden Partikel vom Dieselpartikelfilter (DPF) sehr wirksam zurückgehalten. Wenn jedoch bei der RDE-Mittelwertbildung die DPF-Regeneration mit berücksichtigt wird, liegt die PN 3,6-fach höher als bei einem entsprechenden LPG-betriebenen Opel Astra.
- Der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß ohne Vorkettenbetrachtung von Ottomotoren mit Saugrohr- oder DI-Einspritzung kann durch LPG-Betrieb um 10 - 13 Prozent reduziert werden.
- Der Autogas-betriebene DI-Ottomotor bietet im Vergleich zum Betrieb mit konventionellen Kraftstoffen die folgenden Vorteile:
  - o Die Gemischbildungseigenschaften von LPG haben einen deutlich geringeren Ausstoß von Partikelemissionen zur Folge.
  - o Beim Abgasreinigungssystem kann weiterhin auf den bewährten, kostengünstigen und sehr effektiven Drei-Wege-Katalysator gesetzt werden – ohne dass  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte überschritten werden.
  - o Autogas besitzt einen geringeren energiespezifischen Kohlenstoffgehalt. Daher ist die  $\text{CO}_2$ -Emission in der Tank-to-Wheel-Betrachtung reduziert.
  - o Voruntersuchungen [Günther / Pischinger, 2014] [Kriek / Nagel, 2016] haben gezeigt: Autogas zeichnet sich durch eine hohe Klopfestigkeit und eine geringe Vorentflammungsempfindlichkeit aus. Dies ist die Grundvoraussetzung für eine motorische Wirkungsgradsteigerung – insofern bietet LPG zusätzliches Potenzial zur  $\text{CO}_2$ -Reduktion.

# 1 Projekt-/Aufgabenbeschreibung

---

Wegen seiner besonderen Gemischbildungseigenschaften und seiner Klopfestigkeit können Verbrennungsmotoren mit Autogas mit einem hohen Wirkungsgrad und geringen Schadstoffemissionen betrieben werden. Damit ist Autogas dort eine Alternative, wo Dieselfahrzeuge an  $\text{NO}_x$ -Grenzen oder Direkteinspritzer (DI)-Otto-Benzinfahrzeuge an Partikelgrenzwerte stoßen.

Inwieweit dieses Potenzial real beim Betrieb von EU5/EU6 Pkw genutzt werden kann, soll mit vergleichenden Emissions-Untersuchungen beim Betrieb gleichartiger Pkw mit Autogas, Diesel und Benzin ermittelt werden. Hierzu sollen im Auftrag des Deutschen Verbandes Flüssiggas e. V. mit Hilfe eines modernen PEMS-Gerätes (Portable Emissions Measurement System) RDE-Messungen im Fahrttest auf der Straße sowie Messungen im WLTC auf einem Fahrzeugrollenprüfstand durchgeführt werden. Dies schließt an Untersuchungen des  $\text{NO}_x$ -Emissionsverhaltens von Pkw mit verschiedenen Kraftstoffen vom Januar 2016 an [Heinze / Arndt, 2016].

Schwerpunkt des Vorhabens ist es, im möglichst realitätsnahen Betrieb – dargestellt durch RDE- und WLTC-Fahrten ohne Wichtungen und Verschlechterungsfaktoren – vergleichende Messungen an zufällig ausgewählten, im Kundenbetrieb befindlichen Feldfahrzeugen mit den Kraftstoffen Autogas, Benzin und Diesel vorzunehmen.

## 2 Versuchsfahrzeuge

Für die Untersuchungen wurden die folgenden Fahrzeuge mit Saugrohreinjection (PFI) und Direkteinjection (DI) entsprechend Tabelle 1 ausgewählt.

Hersteller/Modell (LPG-System)	Opel Astra J 1.4 Turbo (Landirezzo OMEGAS +)	Opel Astra J 1.6 CDTi	Skoda Octavia 1.8 TFSI (Prins Direct LiquiMax)	Kia Sportage 1.6 GDI (GFI Ez. Lgi)
				
<b>Motortyp</b>	A14NET	B16DTH	CJSA	G4FD
<b>Treibstoff / Kraftstoffsystem</b>	Benzin/LPG PFI	Diesel CR	Benzin PFI und Benzin/LPG DI	Benzin/LPG DI
<b>Abgasnorm</b>	Euro 5*	Euro 6	Euro 6	Euro 5*
<b>Abgasnachbehandlung</b>	3-Wege-Katalysator	DOC, DPF, NSK	3-Wege-Katalysator	3-Wege-Katalysator
<b>Hubraum (cm<sup>3</sup>)</b>	1364	1598	1798	1591
<b>Leistung (kW)</b>	103	81	132	99
<b>Drehmoment (Nm)</b>	200	300	250	164
<b>Aufladung</b>	ja	ja	ja	nein
<b>Leergewicht (kg)</b>	1613	1613	1352	1502
<b>Antrieb</b>	Front	Front	Front	Front
<b>Getriebe / Anz. Gänge</b>	Manuell / 6	Manuell / 6	Manuell / 7	Manuell / 6
<b>Erstzulassung</b>	01.01.2013	01.03.2016	01.02.2015	01.04.2014
<b>Kilometerstand (km)</b>	70.625	11.139	73.746	27.265
<b>VIN</b>	WOLPE8E43D8025636	WOLPD8E62G8049449	TMBJD7NE7E0034398	U5YPC814ADL369747

\* mit Ausnahme PN, Ottomotoren Grenzwerte EU5 = EU6

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsfahrzeuge

## 3 Messtechnik

---

Im folgenden Absatz wird die verwendete Messtechnik mit Nennung der Messverfahren aufgelistet.

### 3.1 Abgasmesstechnik

Voll ausgestattete RDE-Plattform: AVL m.o.v.e PEMS iS

- Gas PEMS
  - CO, CO<sub>2</sub>: Nicht-dispersiver Ultraviolett-detektor (NDUV)
  - NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>: Nicht-dispersiver Infrarotdetektor (NDIR)
  - CH<sub>4</sub>: Flammenionisationsdetektor (FID)  
(J.U.M. Engineering 3-300A extern integriert ins System)
  
- PN PEMS
  - Partikelanzahl PN: Diffusionsaufladung der Partikel mit anschließender Ladungsmessung des aufgeladenen Aerosols mithilfe eines Elektrometers.

### 3.2 Fahrwiderstands-Simulation (NEFZ, WLTC)

MAHA Rollenprüfstand LPS 2000

- Fahrwiderstandsbremsleistung bis 260 kW
- Prüfgeschwindigkeit bis 260 km/h
- Radial-Luftkühlgebläse 23000 m<sup>3</sup>/h
- PC-basiertes Fahrerleitgerät basierend auf DASyLab

## 4 Messprogramm

### 4.1 Durchgeführte Messungen

Jedes Fahrzeug wurde bei jedem Kraftstoff mindestens zweimal kalt im WLTC auf dem Rollenprüfstand (Zyklus entsprechend UN GTR 15) und dreimal auf der Straße im RDE [nach EU 2016/427 vom 10.03.2016] gefahren. Die WLTC-Tests dienen neben den Emissionsmessungen zur Bestimmung von fahrzeugspezifischen Parametern für die zum Messprogramm gehörenden drei RDE-Fahrten [nach EU 2016/427]. Für erweiterte Optionen der Auswertung und Validierung der Normalität wurden aus den WLTC-Ergebnissen die für die Wichtungsverfahren „TU-Graz CLEAR“ und „JRC EMROAD“ u. a. notwendigen folgenden Größen bestimmt:

- k-Faktor und d-Konstante für die „Vehicle Line“ als Basis für die Bestimmung der CLEAR-Leistungsklassen
- „Moving average window“-Breite und die drei Stützpunkte für die sogenannte Charakteristische Kurve des Fahrzeugs für CO<sub>2</sub> entsprechend dem EMROAD-Verfahren.

Ergänzend wurden bei dem Kia Sportage zwei Emissionsmessungen im NEFZ auf dem Rollenprüfstand, angelehnt an UNECE R101, gefahren.

Fahrzeuge	Kraftstoff	WLTC	RDE	NEFZ
<b>Opel Astra 1.4</b>	Benzin	3	3	-
	EcoFlex	LPG	3	3
<b>Opel Astra 1.6 TDI</b>	Diesel	3	4	-
<b>Skoda Octavia 1.8</b>	Benzin	2	3	-
	TFSI	LPG	3	3
<b>Kia Sportage 1.6</b>	Benzin	2	3	2
	GDI	LPG	2	3

Tabelle 2: Übersicht der durchgeführten Messungen

## 4.2 RDE-Beschreibung

Die Fahrten fanden auf einer speziellen, für die RDE-Anforderungen ausgewählten Strecke statt. Die Fahrstrecke liegt nordöstlich der htw-saar (siehe Abbildung 1).

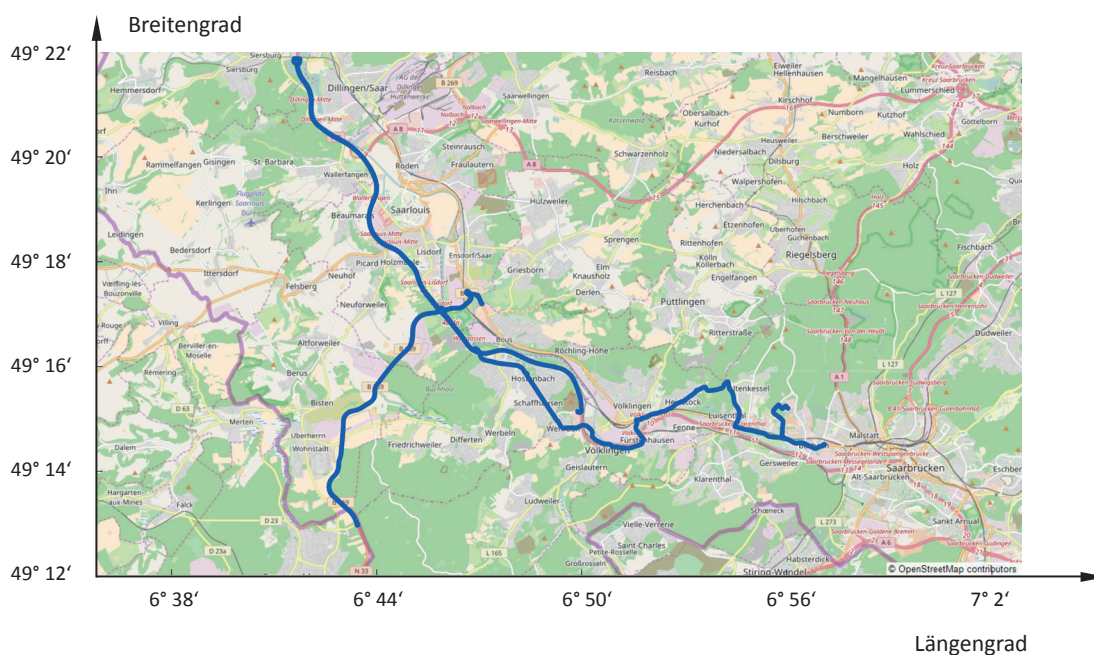


Abbildung 1: Streckenführung der RDE-Strecke

Das zugehörige Höhenprofil ist in Abbildung 2 aufgeführt.

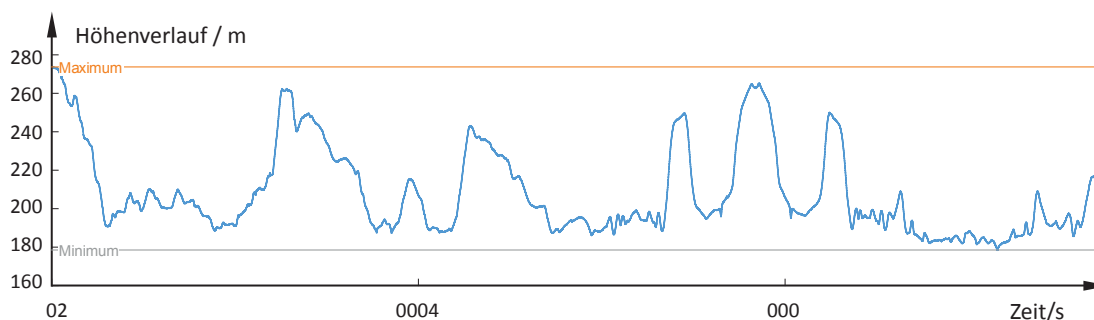


Abbildung 2: Höhenprofil der RDE-Strecke

Die RDE-Teststrecke besteht zu je einem Drittel aus Stadt- (City), Überland- (Rural) und Autobahnverkehr (Motorway). Diese sind sowohl über die Fahrstrecke als auch über die Fahrzeit anzustreben. Hier sind Toleranzen vorgegeben, die eine Konformität im Messbetrieb bei variierenden Verkehrssituationen gewährleisten sollen. Zusätzlich werden diverse Forderungen an das Geschwindigkeitsprofil gestellt. Die Einhaltung dieser Vorgaben wird nach dem Ende der Testfahrt in einer Gesamtübersicht dargestellt.

Aus Abbildung 3 gehen die wichtigsten Anforderungen an die RDE-Strecke hervor. Alle Anforderungen werden in die drei Geschwindigkeitsbereiche Urban (1 - 60 km/h), Rural (60 - 90 km/h) und Motorway (>90 km/h) eingeteilt. Zusätzlich erfolgt eine Betrachtung in der Totalen.

Trip Requirements		Urban	Rural	Motorway	Total
Velocity Thresholds	km/h	[1–60[	[60–90[	[90– ...	
ave Velocity ECU	km/h	27.4	74.5	102.5	49.3
share <= 1km/h; minutes >= 100 km/h		11 %		11.9 min	
Trip Share ECU Distance	%	34.8	32.4	32.8	
Distance ECU	km	27.18	25.27	25.61	78.07
Duration	min	60	20	15	95
Max. Velocity	km/h			118.0	
% Velocity 145–160 km/h (max 3 %)				0	

**Abbildung 3: Anforderungen an die Messstrecke**

Insbesondere muss die Durchschnittsgeschwindigkeit im Stadtbereich 15 - 30 km/h betragen, gleichzeitig muss eine Standzeit von mindestens 10 Prozent gewährleistet werden. Außerdem muss mindestens 5 min über 100 km/h gefahren werden. Darüber hinaus muss die Strecke zu je einem Drittel Stadt, einem Drittel Überland und einem Drittel Autobahn bestehen (streckenbezogen).

Parallel dazu muss eine Gesamtdauer zwischen 90 und 120 min erreicht werden. Ein Geschwindigkeitsbereich zwischen 145 und 160 km/h darf nur maximal 3 Prozent der Autobahnfahrt ausmachen.

Die Einhaltung gesetzlich vorgegebener Variablen wird von dem Auswertungs-Tool bei Erfüllung in Grün und bei Verfehlen in Rot dargestellt.

## 5 Ergebnisse

Die Detailergebnisse aller vorgenommenen Messungen liegen in Form von Ergebnisblättern (result sheets) vor. Nachfolgend werden nur gemittelte und ungewichtete Resultate ohne Anwendung von Verschlechterungsfaktoren dargestellt. Eine Auflistung der Ergebnismittelwerte ist in Tabelle 4 zu finden. Die Ausweisung der Ergebnisse erfolgt als Absolutwert in g/km und als CF (compliance factor). Der CF stellt das Verhältnis des Messwerts zum Grenzwert dar. Ein CF bis 1 steht für die Einhaltung des Grenzwerts, ein Wert > 1 bedeutet eine Überschreitung des Grenzwerts. Hierzu wurden die Grenzwerte entsprechend der folgenden Tabelle 3 mit einem eigenen Teilungsansatz für den EU6-Summengrenzwert HC + NO<sub>x</sub> verwendet. Bei den CF für die Partikelanzahl wird zur Einordnung der EU5-Fahrzeuge ebenfalls der EU6c-Grenzwert verwendet, um den zukünftigen Entwicklungsaufwand beziehungsweise das Potenzial für die jeweilige Technologie darzustellen.

	Otto EU5/EU6c	Diesel EU6
NO <sub>x</sub> [g/km]	0,060	0,08 <sup>1</sup>
HC [g/km]	0,10	0,09 <sup>1</sup>
CO [g/km]	1	0,5
PN [# /km]	6E+11	6E+11

<sup>1</sup> Teilungsansatz nicht nach EU6

Tabelle 3: Bezugsgrenzwerte für die CF-Berechnung



Fahrzeug/ Kraftstoff	Mittelwert über n Messun- gen	Absolute Emissionen							CO <sub>2</sub> - Homol. im NEFZ [g/km]	Emissionen im Verhältnis zum Grenzwert*			
		PN [#/km]	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO <sub>2</sub> [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	PN		CO	HC	NO <sub>x</sub>	
Astra LPG	3	8,51E+10	110	0,777	0,012	0,009	0,009	132	0,143	0,777	0,119	0,160	
Astra Benzin	3	1,77E+12	121	1,845	0,024	0,006	0,011	144	2,960	1,846	0,237	0,176	
Astra Diesel	3	1,23E+10	100	0,037	0,009	0,349	0,463	97	0,020	0,113	0,111	5,830	
Astra Diesel mit DPF- Regeneration	4	3,11E+11	105	0,046	0,010	0,357	0,466	97	0,518	0,086	0,111	5,830	
Octavia LPG	3	1,30E+11	111	0,267	0,006	0,007	0,007	132	0,220	0,266	0,059	0,113	
Octavia Benzin	3	3,91E+11	122	0,306	0,004	0,006	0,007	132	0,650	0,306	0,039	0,116	
Sportage LPG	3	8,30E+10	126	2,863	0,008	0,014	0,020	158	0,140	3,667	0,079	0,330	
Sportage Benzin	3	4,97E+12	140	2,819	0,009	0,008	0,010	158	8,287	2,823	0,094	0,170	
Astra LPG	3	2,63E+11	157	1,479	0,062	0,029	0,037	132	0,439	1,479	0,619	0,062	
Astra Benzin	3	2,97E+12	167	1,445	0,046	0,035	0,041	144	4,946	1,445	0,462	0,068	
Astra Diesel	3	5,84E+09	160	0,013	0,010	0,553	0,687	97	0,010	0,025	0,107	8,588	
Octavia LPG	2	2,36E+11	130	0,232	0,024	0,014	0,015	132	0,393	0,232	0,240	0,026	
Octavia Benzin	3	4,65E+11	143	0,220	0,032	0,020	0,020	132	0,775	0,220	0,324	0,033	
Sportage LPG	2	5,03E+10	173	2,958	0,023	0,029	0,036	158	0,084	2,958	0,233	0,061	
Sportage Benzin	2	6,80E+12	191	2,483	0,021	0,015	0,021	158	11,331	2,483	0,215	0,035	

\* Grenzwertüberschreitungen sind rot markiert, eingehaltene Grenzwerte grün

Tabelle 4: Gesamtübersicht der Ergebnisse

Nachfolgend werden die wichtigsten Feststellungen der Messreihen zuerst nach Fahrzeugen und anschließend nach Emissionen aufgeschlüsselt dokumentiert.

## 5.1 Ergebnisse nach Fahrzeugen

### 5.1.1 Skoda Octavia 1.8 TFSI (DI: Benzin & LPG, PFI: Benzin)

Der Skoda Octavia mit 1.8 TFSI Ottomotor ist ab Werk mit einem DI-Einspritzsystem und zusätzlich mit einem Saugrohreinspritzsystem (PFI) ausgestattet. Über das PFI-System wird nur eingespritzt, wenn die Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte bezüglich Emissionen, insbesondere Partikelmasse und Partikelanzahl, eine besondere Gemischaufbereitung erfordert. Das Fahrzeug wurde von Prins Autogassystemen B.V. mit der Autogasanlage „Direct Liqui-Max“ umgerüstet. Ein besonderes Merkmal dieser Autogasanlage ist, dass im LPG-Betrieb nur die DI-Injektoren mit Autogas betrieben und die PFI-Injektoren weiterhin mit Benzin versorgt werden.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der RDE-Messungen und Abbildung 5 die Resultate der WLTC-Tests an diesem Fahrzeug.

#### Skoda Octavia RDE Conformity Factors

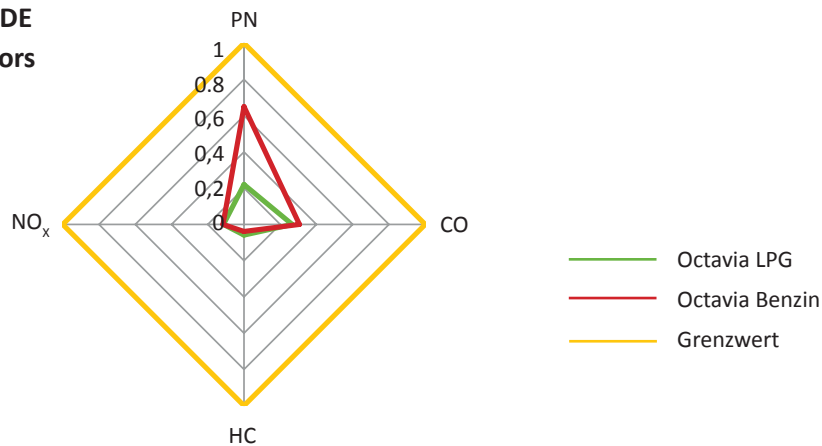


Abbildung 4: RDE-Ergebnisse beider Kraftstoffe des Skoda Octavia

**Skoda Octavia WLTC  
Conformity Factors**

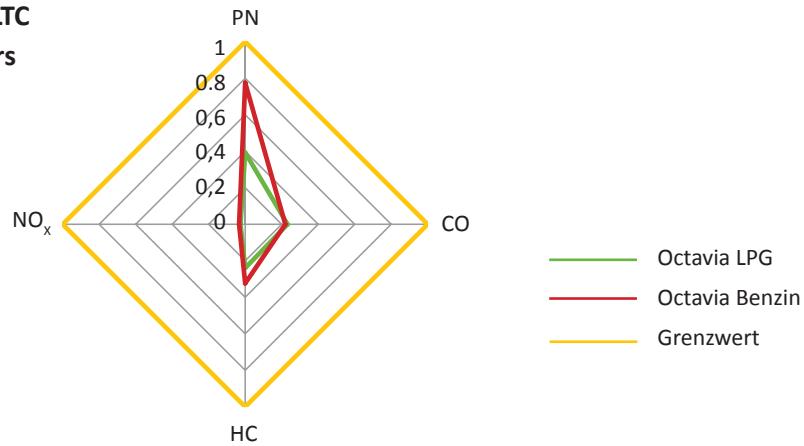


Abbildung 5: WLTC-Ergebnisse beider Kraftstoffe des Skoda Octavia

Alle im RDE- und WLTC-Betrieb gemessenen Emissionswerte liegen deutlich unterhalb der EU6c-Grenzwerte.

**Gasförmige Emissionen**

Die CO-, HC- und NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen bei Benzin- und LPG-Betrieb bei < 40 Prozent des Grenzwerts. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Betriebsarten Benzin und LPG ist bei den gasförmigen Schadstoffemissionen erwartungsgemäß nicht gegeben, da der Ottomotor im RDE-Test weitgehend lambdageregelt stöchiometrisch im Betriebsfenster des Drei-Wege-Katalysators betrieben wird.

**Partikelanzahl, PN-Emissionen**

Im LPG-Betrieb wird im Vergleich zum Benzinbetrieb die Partikelanzahl um 50 bis 70 Prozent reduziert, obwohl seitens des Motorenherstellers bereits mit der genannten PFI-Unterstützung eine Methode zur Partikelreduktion in Verwendung ist.

Im WLTC (Abbildung 5) ist das Verhalten grundsätzlich ähnlich wie im RDE-Betrieb. Die Kohlenwasserstoff-Emissionen liegen etwas höher, wobei die Grenzwerte nach wie vor deutlich eingehalten werden. Der Grund hierfür liegt beim WLTC im Kaltstart mit sich anschließender

Warmlaufphase, wobei anfangs der Drei-Wege-Katalysator noch nicht voll betriebsbereit ist.

### 5.1.2 Opel Astra 1.4 Eco-Flex & 1.6 CDTI (PFI: Benzin & LPG, DI: Diesel)

Der Opel Astra wurde für diese Messreihe gewählt, da er in allen drei Kraftstoffvarianten zur Verfügung stand. Damit bildet er eine sehr gute Basis für den Vergleich aller Kraftstoffe bei einem gleichartigen Fahrzeug. Bei der verwendeten Ottomotor-Bi-Fuel-Variante ab Werk werden Saugrohreinspritzsysteme sowohl für den Benzin- als auch für den LPG-Betrieb genutzt. Beim Dieselmotor ist eine Common-Rail-DI-Einspritzung verbaut.

#### Opel Astra RDE Conformity Factors

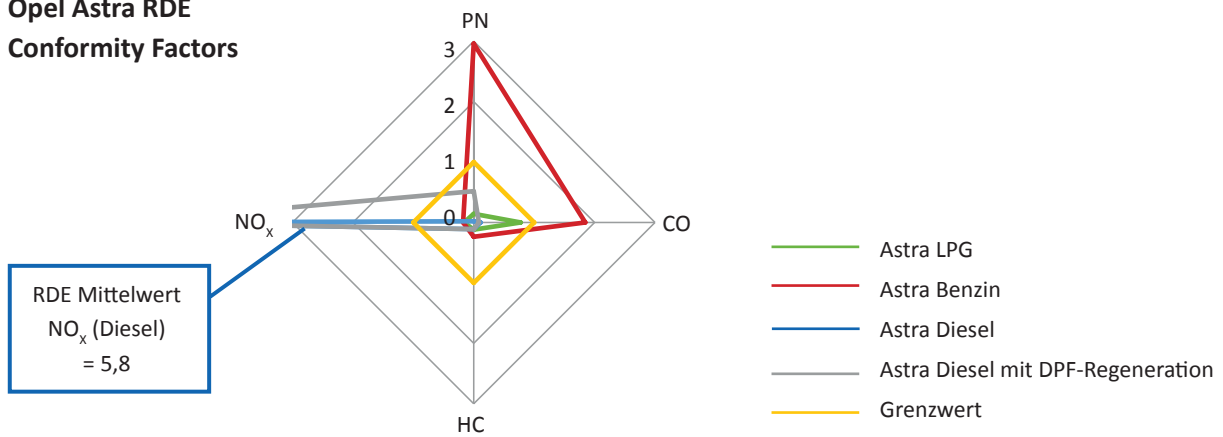


Abbildung 6: Ergebnisse der RDE-Fahrten des Opel Astra

#### Opel Astra WLTC Conformity Factors

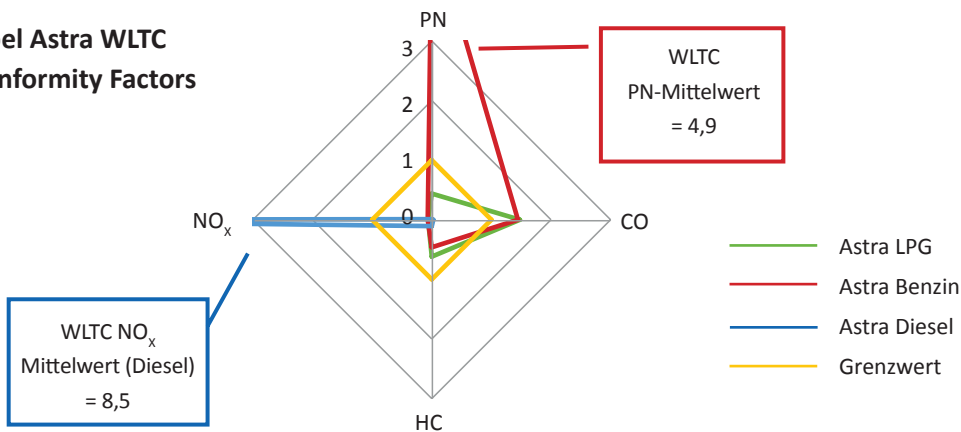


Abbildung 7: Ergebnisse der WLTC-Fahrten des Opel Astra

Die im RDE gemessenen Emissionen aller Kraftstoffvarianten zeigt Abbildung 6.

Die WLTC-Ergebnisse sind entsprechend in Abbildung 7 aufbereitet.

### **NO<sub>x</sub>-Emissionen**

Besonders auffällig sind die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Dieselfahrzeugs. Der zulässige Euro-6-Grenzwert wird im Durchschnitt aller Messungen um den Faktor 5,8 - 8,5 überschritten. Offensichtlich ist es mit dem derzeitigen Abgasreinigungssystem beziehungsweise dessen Einstellung nicht möglich, die NO<sub>x</sub>-Grenzwerte einzuhalten. Im Vergleich hierzu emittiert das Fahrzeug mit Ottomotor im LPG- und im Benzinbetrieb im Durchschnitt nur einen Bruchteil, nämlich rund 1/50, der NO<sub>x</sub>-Emissionen der Dieselvariante. Bezogen auf den Euro-6-Grenzwert für Fahrzeuge mit Ottomotor ergibt sich ein CF von ca. 17 Prozent. Somit wird der Euro-6-Grenzwert durch die LPG- und Benzinvarianten nur um ca. 17 Prozent ausgenutzt, wobei hierzu nur ein relativ einfacher und kostengünstiger Drei-Wege-Katalysator mit Lambda-regelung erforderlich ist.

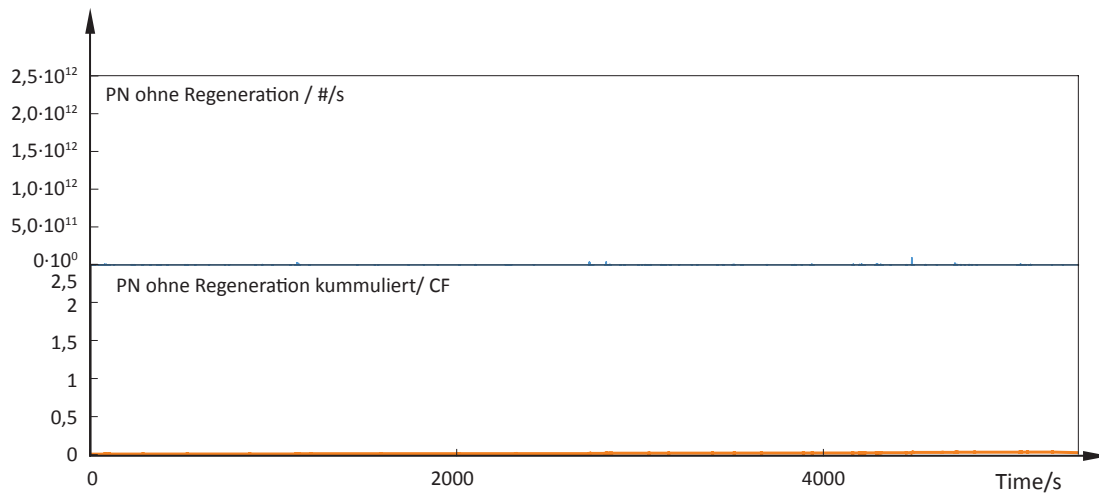
### **CO-Emissionen**

Die CO-Emissionen sind beim mager brennenden Dieselmotor wie erwartet unproblematisch. Beim Benzin/LPG-Betrieb liegen die gemessenen Werte in der Nähe des zulässigen Grenzwerts, wobei die CO-Emissionen im RDE-Benzinbetrieb etwas höher lagen, allerdings einen CF 2,1 (vergleiche Phase 1 der RDE-Einführung) nicht überschritten.

### **Partikelanzahl (PN), Partikelemissionen**

Die Messungen der Partikelanzahl an den Astra-Fahrzeugen zeigen an zwei Stellen ein auffälliges Verhalten. Zum einen erreicht im Benzinbetrieb der Astra in der getesteten EU5-Variante trotz einer Saugrohreinspritzung nur einen (Euro-6c) CF von 3 - 4,9. Jedoch wurde im LPG-Betrieb eine deutliche PN-Reduktion nachgewiesen. Der gemessene CF-Wert lag hier nur bei 0,14 - 0,44. Vergleicht man die beiden Betriebsarten Benzin und LPG, so zeigt sich, dass durch den LPG-Betrieb die Anzahl der emittierten Partikel um rund 90 - 95 Prozent reduziert wird.

Zum anderen zeigen die PN-Messungen in Abbildung 7 am Diesel-Astra eine hochwirksame Partikelrückhaltung des Partikelfilters (DPF). Dies gilt allerdings nur dann, wenn bei den RDE-Fahrten die Regenerationen des DPF – wie gesetzlich vorgesehen – nicht berücksichtigt werden (blaue Linien). Bei einer von vier RDE-Fahrten wurde jedoch zufällig eine Regeneration mit gemessen. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die zeitlichen Verläufe der



PN-Emissionen mit und ohne Regeneration.

Abbildung 8: Partikelverlauf ohne Regeneration

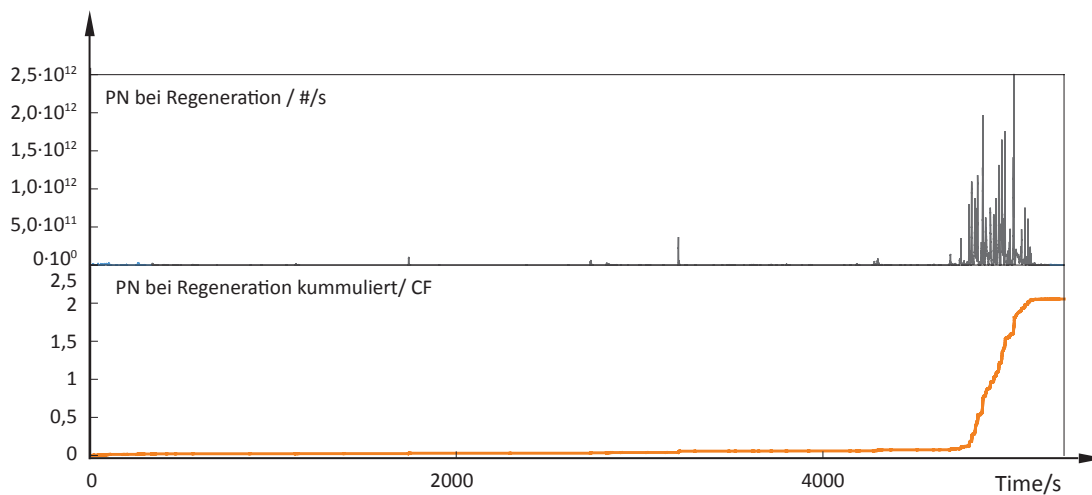


Abbildung 9: Partikelverlauf mit Regeneration

Die Regenerationshäufigkeit 1 von 4 entspricht dem mittleren Speicherverhalten eines DPF. Zu Vergleichszwecken wurde ebenfalls in Abbildung 6 eine Mittelung mit der Regeneration (siehe graue Linien) dargestellt. Der Vergleich an dieser Stelle zeigt, dass der mit LPG betriebene Astra, der keine Regenerationen benötigt, bei der beschriebenen Mittelung im RDE eine um den Faktor 3,6 geringere Partikelanzahl emittiert als der Diesel-Astra mit DPF bei Berücksichtigung von Regenerationen (siehe Abbildung 10).

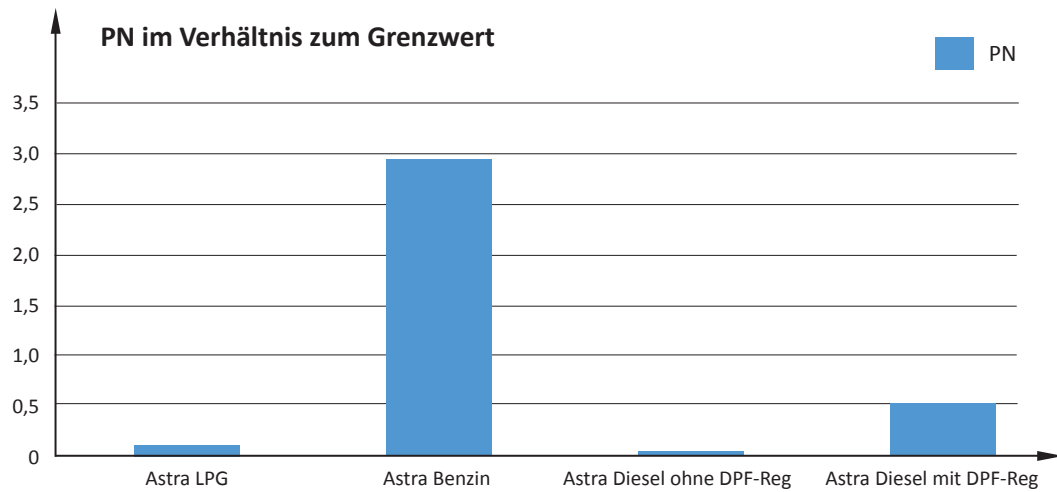


Abbildung 10: Vergleich der Partikelemissionen

### 5.1.3 Kia Sportage 1.6 GDI (DI: Benzin & LPG)

Der Kia Sportage 1.6 GDI wird von einem DI-Ottomotor angetrieben. Das Fahrzeug wurde mit einer GFI Ez. Lgi DI-Autogasanlage nachgerüstet. Bei beiden möglichen Betriebsarten – LPG und Benzin – wird der Kraftstoff über die gleichen DI-Injektoren eingespritzt. Das Fahrzeug besitzt eine EU5-Zulassung, womit es für die Homologation noch keine gesetzlich festgelegten Partikelgrenzwerte einhalten musste. Der Kia wurde mit in das Messprogramm genommen, um insbesondere das Emissionsverhalten von DI-Autogasbetrieb im Vergleich zur Benzindirekteinspritzung moderner Ottomotoren zu untersuchen.

#### KIA Sportage RDE Conformity Factors

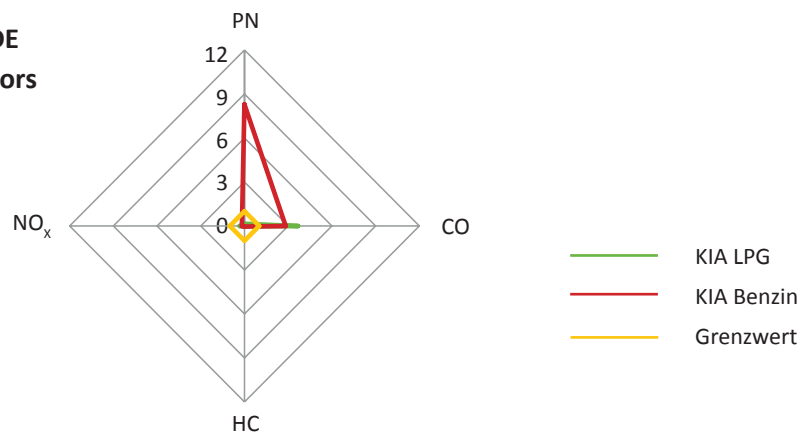


Abbildung 11: Kia Sportage Conformity Factors RDE

**KIA Sportage RDE  
Conformity Factors**

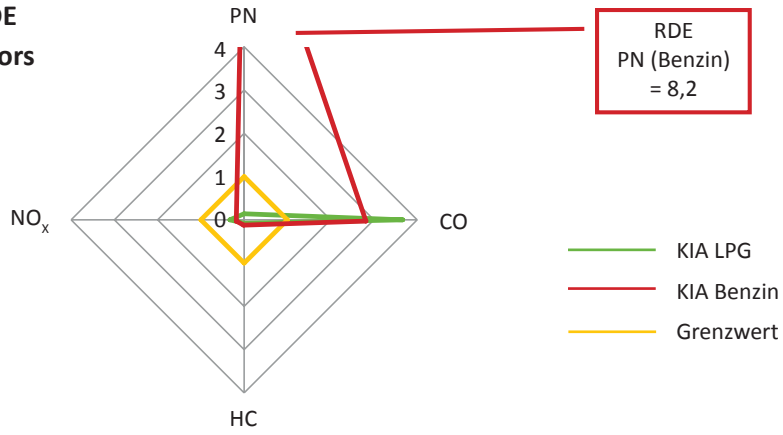


Abbildung 12: Kia Sportage Conformity Factors RDE (vergrößerte Darstellung)

**KIA Sportage WLTC  
Conformity Factors**

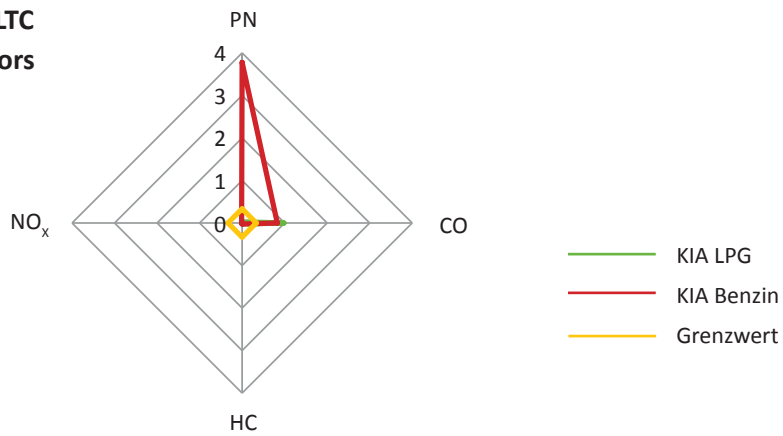


Abbildung 13: Kia Sportage Conformity Factors WLTC



**KIA Sportage RDE  
Conformity Factors**

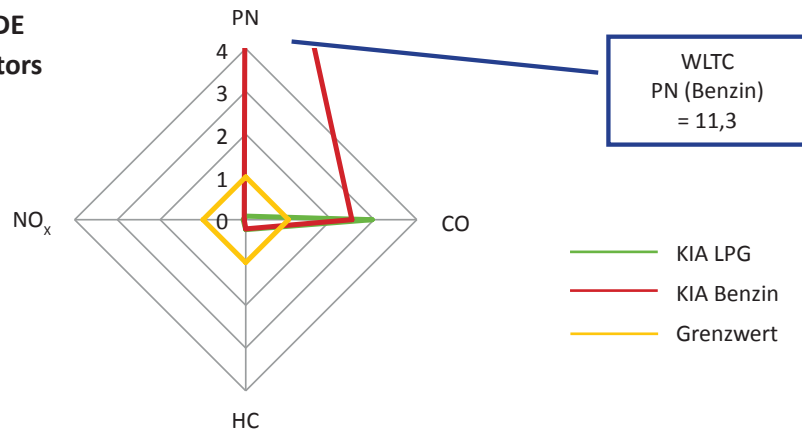


Abbildung 14: Kia Sportage Conformity Factors WLTC (vergrößerte Darstellung)

Abbildung 11 und Abbildung 13 zeigen die im RDE- und WLTC-Betrieb erzielten Messergebnisse. Zur besseren Lesbarkeit der Non-PN-Emissionen sind die Diagramme jeweils auch nochmals mit „gezoomten“ Achsen in Abbildung 12 und Abbildung 14 dargestellt.

**Partikelanzahl, PN-Emissionen**

Bei den Partikelemissionen zeigt sich ein sehr großer Unterschied zwischen Benzin- und Autogasbetrieb. Im Benzinbetrieb werden die Euro-6c-PN-Grenzwerte derzeit noch um einen Faktor 8,2 - 11,3 überschritten. Durch die Nachrüstung des DI-Autogassystems konnten die PN-Emissionen im LPG-Betrieb um bis zu 99 Prozent reduziert werden. Die Euro-6c-PN-Grenzwerte werden durch den LPG-Betrieb ohne weitere technische Änderungen im RDE- und WLTC-Betrieb sicher eingehalten. Die Messwerte im LPG-Betrieb bleiben um den Faktor 6 unter dem Grenzwert.

**NO<sub>x</sub>-Emissionen**

Ebenso wie alle bereits genannten Fahrzeuge mit stöchiometrischen Ottomotoren mit Drei-Wege-Katalysator wurden am Kia nur sehr geringe NO<sub>x</sub>-Emissionen im RDE-Betrieb gemessen. Mit maximal 20 mg NO<sub>x</sub>/km liegen diese unter einem Drittel des zulässigen Grenzwerts.

## CO-Emissionen

Die CO-Emissionen liegen bei Benzin- und LPG-Betrieb signifikant oberhalb der EU5/EU6-Grenzwerte. Im RDE wurde ein mittlerer CF = 3,2 und im WLTC ein mittlerer CF = 2,7 gemessenen. Zur Gegenprüfung dieses Verhaltens wurden ergänzende NEFZ-Tests in das Messprogramm übernommen. Abbildung 15 zeigt alle CO-Messungen im Vergleich.

### Kia Sportage CO-Emissionen (CF normiert)

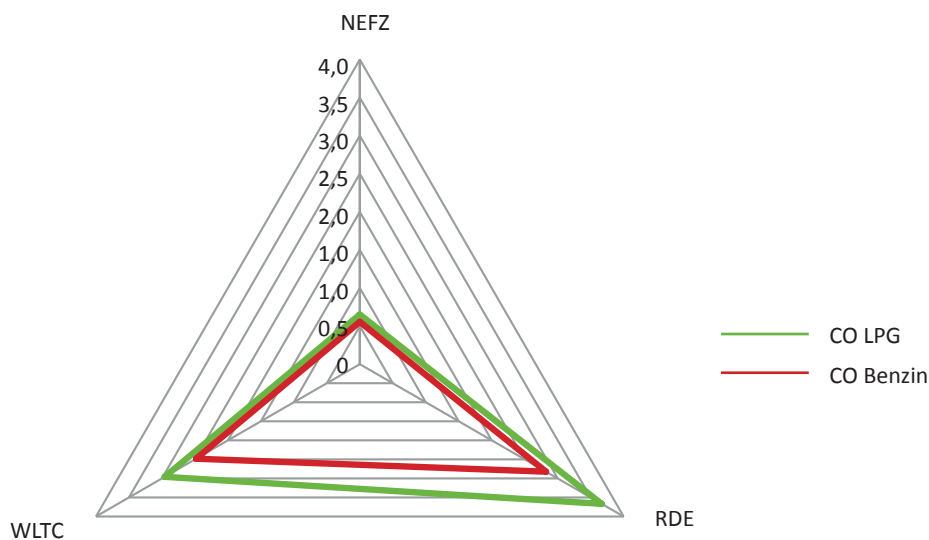


Abbildung 15: Kia Sportage CO-Emissionen CF RDE/WLTC/NEFZ

Der Kia Sportage hält bei den gefahrenen NEFZ-Zyklen die EU5/EU6-CO-Grenzwerte mit einem CF = 0,6 sicher ein. Die hier festgestellten Grenzwertüberschreitungen ergeben sich aus den Fahrbedingungen, die im Vergleich zum NEFZ durch RDE und WLTC geändert wurden. Das Fahrzeug wurde aus Sicht der Schadstoffemissionen bisher nicht auf höhere Hochlast- und Beschleunigungsanteile optimiert, wie diese im RDE und WLTC auftauchen. Die CO-Grenzwertüberschreitungen in RDE und WLTC lassen sich offensichtlich auf applikationsspezifische Anfettungen zurückführen, die der Hersteller mit einem Schwerpunkt auf eine bessere Fahrbarkeit und Bauteilschutz derzeit noch verwendet.

## 5.2 Ergebnisvergleich nach Emissionen

### 5.2.1 Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

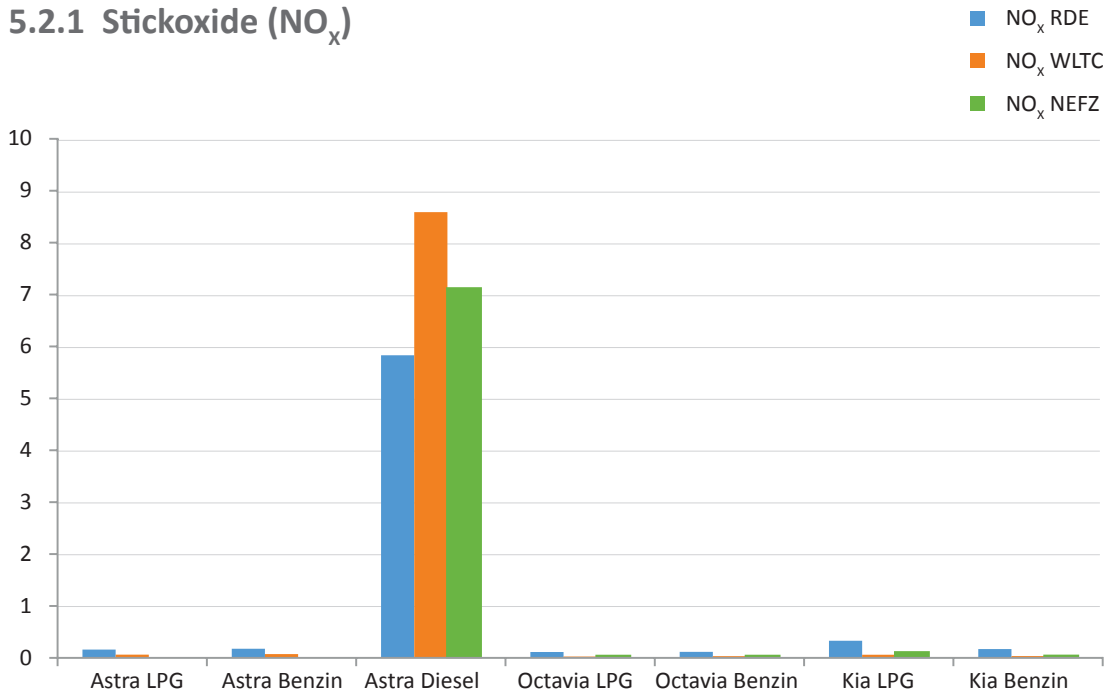


Abbildung 16: Übersicht Stickoxide

Das Diesel-Fahrzeug überschreitet bei allen Messungen die EU6-Grenzwerte für NO<sub>x</sub> um hohe Faktoren. Die Überschreitungsfaktoren lagen im RDE bei 5,8 und im WLTC bei 8,5. Es ist ganz offensichtlich, dass die bisherige Diesel-Abgasreinigungstechnologie in der Art und Weise, wie sie bisher ausgelegt beziehungsweise aus Gründen des Komponentenschutzes und der Wartungshäufigkeit eingestellt wird, derzeit nicht in der Lage ist, die aktuellen EU6-Grenzwerte im realitätsnahen Betrieb einzuhalten.

Ein völlig anderes Bild zeigen alle NO<sub>x</sub>-Messungen an Ottomotoren. Unabhängig vom Benzin- oder LPG-Betrieb wird der NO<sub>x</sub>-Grenzwert im realitätsnahen Fahrbetrieb deutlich unterschritten. Hintergrund ist die Abgasreinigung über ein Drei-Wege-Katalysator-Verfahren mit Lambdaregelung. Sie wurde vor rund 30 Jahren in Deutschland eingeführt und hat mittlerweile einen Reifegrad, mit dem sie – im Gegensatz zur Diesel-Abgasreinigung – ohne Probleme sehr kostengünstig und effektiv eingesetzt werden kann. Bei Magermotoren wie dem Dieselmotor ist dies nicht möglich.

## 5.2.2 Partikel, Partikelanzahl (PN)

Der Partikelanzahlvergleich in Abbildung 17 zeigt eindeutig das Hauptabgasproblem von homogen betriebenen Benzinmotoren mit Direkteinspritzung. Aufgrund einer teilweise unvollständigen Gemischbildung überschreitet der Kia den EU6c-Grenzwert im Durchschnitt 10-fach (mittlerer CF = 10). Betreibt man das gleiche Fahrzeug mit dem gleichen Motor mit Autogas (siehe die Balken „Kia LPG“) wird der Partikel ausstoß um 95 - 99 Prozent reduziert. Durch die Verwendung eines Kraftstoffs mit einem niedrigen Siedepunkt, wie es bei LPG der Fall ist, kann das Partikelproblem des DI-Ottomotors gelöst werden. Die Gemischbildungseigenschaften von Autogas erlauben den partikelarmen Betrieb des derzeit aus Gründen des Kraftstoffverbrauchs favorisierten DI-Ottomotors, ohne dass zur Erreichung der EU6c-Grenzwerte ein Partikelfilter oder ein zweites PFI-Einspritzsystem wie beim Skoda Octavia eingebaut werden muss.

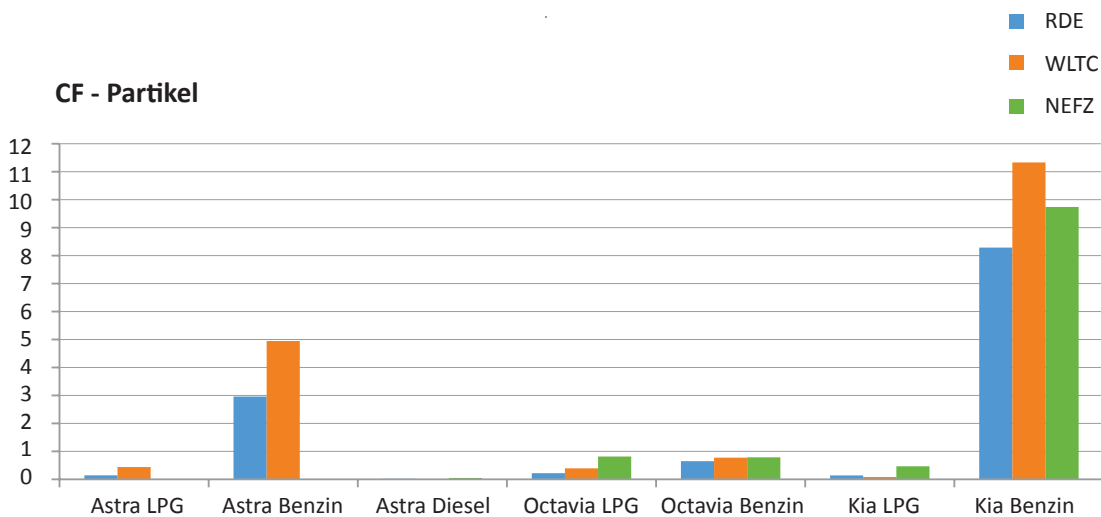


Abbildung 17: Partikelemissionen aller Fahrzeuge im Verhältnis zum Euro-6c-Grenzwert

Überraschend waren die PN-Emissionen beim Opel Astra im Benzinbetrieb. Abbildung 17 zeigt, dass unter bestimmten Umständen selbst mit einer Saugrohreinspritzung (PFI) die EU6c-PN-Grenzwerte für Direkteinspritzermotoren überschritten werden können. Hierzu ist allerdings auch die EU5-Homologation des Fahrzeugs zu berücksichtigen, die keine PN-Grenzen für den Hersteller des Fahrzeugs vorgegeben hat. Auch im Bereich EU6c sind für PFI-Fahrzeuge keine Grenzwerte bezüglich der Partikelanzahl vorgeschrieben. Betreibt man wiederum den gleichen Opel Astra mit LPG, kann der Partikel ausstoß PN wieder signifikant reduziert werden.

### 5.2.3 CO<sub>2</sub>-Einsparung

Wie am Anfang beschrieben erfasst das PEMS auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen während der RDE-Messfahrten auf der Straße oder im WLTC auf der Rolle. Abbildung 18 zeigt die aus dem Vergleich von Ergebnissen berechnete mittlere Tank-to-wheel-Einsparung (TTW) von CO<sub>2</sub> relativ zum Benzinbetrieb.

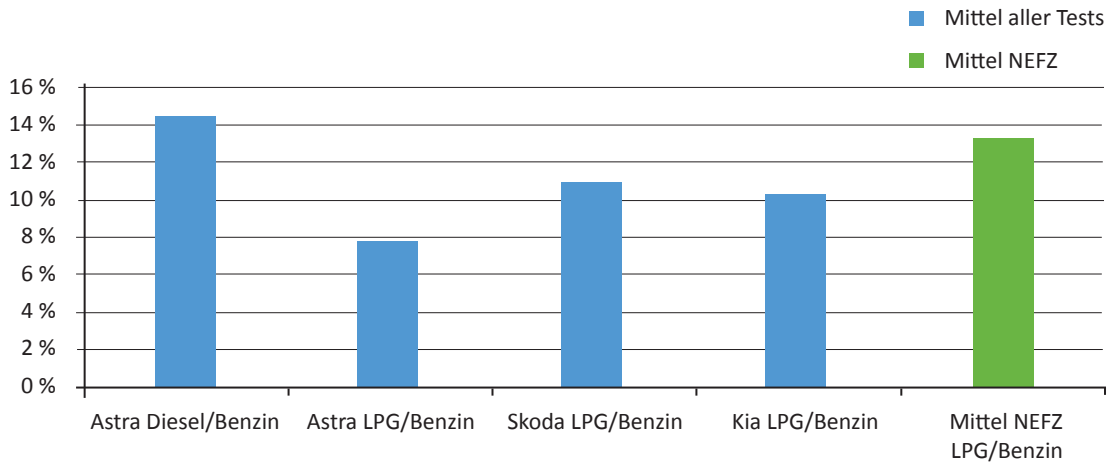


Abbildung 18: CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale

Die CO<sub>2</sub>-Einsparungen TTW lagen im LPG-Betrieb im Durchschnitt aller Tests bei ca. 10 Prozent relativ zum Benzinbetrieb. Betrachtet man nur den NEFZ, lag die LPG-bedingte mittlere CO<sub>2</sub>-Einsparung bei ca. 13 Prozent. Dies entspricht CVS-Messungen technischer Dienste bei der Homologation von EU6-LPG-Umrüstungen. Das Dieselfahrzeug erreichte im Vergleich zum Benzinbetrieb eine über alle Tests gemittelte TTW-CO<sub>2</sub>-Einsparung von ca. 14 Prozent.

## Quellenverzeichnis

---

Europäische Kommission (2016), Verordnung (EU) 2016/427, Brüssel;  
<http://data.europa.eu/eli/reg/2016/427/oj>

Günther, M.; Pischinger, S. et al. LPG System comparison, Project no. 1069, Report 1055,  
FVV - Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., 2014.

Heinze, T.; Arndt, D.: NO<sub>x</sub>-Emissionsverhalten von Pkw mit verschiedenen Kraftstoffen,  
Diesel – Autogas – Benzin, DVFG e.V., 2016.

Kriek, M.; Nagel, D; et al.: LPG System Comparison II, Project no. 1151, Report 1108,  
FVV - Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., 2016.

UNECE Regulation No. 101 Uniform provisions concerning the approval of passenger cars  
powered by an internal combustion engine only [...];  
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R101r3e.pdf>





**Hochschule für Technik und  
Wirtschaft des Saarlandes**  
Institut Automotive Powertrain  
Goebenstr. 40  
D-66117 Saarbrücken