

Projektträgerschaft  
Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung  
(BW-PLUS)

## Schadstoffemissionen von Pkw mit reformulierten Kraftstoffen unter realen Fahrbedingungen

von  
G. Hitzler, M. Bargende

Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen  
und Fahrzeugmotoren Stuttgart  
FKFS

Die Arbeiten der Projektträgerschaft Programm Lebensgrundlage  
Umwelt und ihre Sicherung (BW-PLUS) werden mit  
Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Förderkennzeichen: PEF 3 97 006

71 Seiten  
38 Abbildungen  
42 Literaturstellen

Februar 2000

# **Schadstoffemissionen von Pkw mit reformulierten Kraftstoffen unter realen Fahrbedingungen**

G. Hitzler, M. Bargende

Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)

mit Unterstützung des

Institut für Verfahrenstechnik und Dampfesselwesen, Abt. Reinhaltung der Luft (IVD)

## **Zusammenfassung**

Zukünftige Abgasgrenzwerte für Pkw lassen sich nicht mehr ausschließlich mit motortechnischen Maßnahmen erreichen. Vielmehr müssen fahrzeug- und motortechnische Verbesserungen durch kraftstoffseitige Maßnahmen ergänzt werden. Wie Untersuchungen zeigen, lassen sich durch eine Absenkung des Aromatengehalts und eine Anhebung des Sauerstoffgehalts im Kraftstoff die Emissionen der limitierten Schadstoffe und des Benzols reduzieren. In Fahrzeugen mit geregelter Katalysator können aber nichtlimitierte Schadstoffe wie  $N_2O$ , das im Vergleich zu Kohlendioxid pro Mol ca. 270 mal stärker zur Erwärmung der Erdatmosphäre beiträgt, durch den Einsatz sauerstoffhaltiger Kraftstoffe verstärkt gebildet werden.

In diesem Vorhaben wurden die Auswirkungen reformulierter Kraftstoffe auf die Emissionen solcher nichtlimitierter Stoffe in einem Fahrzeug mit neuester Abgasminderungstechnik untersucht. Die Messungen wurden unter realitätsnahen Bedingungen auf dem Abgasrollenprüfstand des FKFS durchgeführt. Dazu wurden typische Fahrprofile des Ballungsraumes Stuttgart gefahren, um so auch den Einfluss niedriger Katalysatortemperaturen auf die Schadstoffzusammensetzung zu erfassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit reformulierten Kraftstoffen eine Verringerung der Emissionen der Schadstoffe  $N_2O$  und Benzol erreicht werden kann. Bei den gesetzlich limitierten Schadstoffen sinken die Emissionen der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxids während bei den Stickoxiden eine Zunahme der Emissionen zu verzeichnen war.

Die Untersuchungen verdeutlichen die Abhängigkeit der Emissionsfaktoren vom verwendeten Kraftstoff wie auch vom Fahrprofil.

## Summary

G. Hitzler, M. Bargende

Future exhaust-gas limit values for passenger car can be achieved no longer exclusively with engine measures. Vehicle and engine improvements must be rather completed by fuel measures. As investigations show, a reduction of limited pollutant emissions as well as benzene can be achieved by a reduction of the aromatic content and a raise of the oxygen content in fuel.

By the application of oxygen-containing fuels in vehicles with lambda-probe equipped catalyst however not-limited pollutants can be formed such as  $N_2O$ , which contributes approx. 270 times more per mole to the heating up of the terrestrial atmosphere compared with carbon dioxide. In this project the effects of reformulated fuels on the emissions of not-limited pollutants were examined in a vehicle with newest exhaust reduction technique. The measurements were executed under close-to-reality conditions on the roller test bench of the FKFS. In addition typical driving profiles of the urban area of Stuttgart were driven, as for example a ride in an area with a speed limit of 30 km/h to show the influence of low catalyst temperatures on the pollutant composition.

The measuring results shows the positive effect on limited and also on unlimited exhaust gas emissions by using reformulated fuels. The expected effect of raising  $N_2O$  emissions by using oxygenated fuel didn't take place, on the contrary a reduction of about 45%  $N_2O$  was indicated. Only the  $NO_x$ -emissions raise about 10% in relation to the standard fuel.

The investigations shows the dependence of emission factors on driving conditions as well as on fuel composition.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungsverzeichnis .....	III
Abkürzungsverzeichnis .....	V
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Emissionen von Kraftfahrzeugen .....</b>	<b>3</b>
2.1. Schadstoffe in Abgasen von Ottomotoren .....	3
2.1.1. Gesetzlich limitierte Schadstoffe in Abgasen von Kraftfahrzeugen mit Ottomotor .....	4
2.1.2. Gesetzlich nicht limitierte Schadstoffe in Abgasen von Kraftfahrzeugen mit Ottomotor .....	5
2.2. Der Einfluss von Katalysatoren auf die Emissionen .....	7
2.2.1. Reaktionen der gesetzlich limitierten Schadstoffe an der Katalysator- oberfläche .....	8
2.2.2. Bildung von Distickstoffoxid im Katalysator .....	8
2.3. Der Einfluss von Kraftstoffen auf die Emissionen .....	9
2.3.1. Anstrengungen zur Luftreinhaltung .....	10
2.3.2. Reformulierte Kraftstoffe .....	10
2.3.3. Auswirkungen der Kraftstoffbestandteile auf die Emissionen der gesetzlich limitierten Schadstoffe .....	11
2.4. Auswirkungen der Kraftstoffbestandteile auf die Emissionen von Distickstoffoxid .....	13
<b>3. Versuchsaufbau und Messtechnik .....</b>	<b>15</b>
3.1. Versuchsaufbau .....	15
3.2. Messtechnik .....	16
3.2.1. Temperaturmessung .....	16

## Inhaltsverzeichnis

3.2.2.	Probenanalyse .....	16
3.3.	Messprogramm.....	17
3.3.1.	Die untersuchten Kraftstoffe .....	17
3.3.2.	Die verwendeten Katalysatoren .....	19
3.3.3.	Die Testzyklen.....	19
<b>4.</b>	<b>Auswertung.....</b>	<b>21</b>
4.1.	Einfluss der Kraftstoffe auf die Emissionen des Katalysators mit Keramikträger.....	21
4.1.1.	Einfluss der Kraftstoffe auf den Ausstoß von Distickstoffoxid (N <sub>2</sub> O) .....	21
4.1.2.	Einfluss der Kraftstoffe auf den Ausstoß der gesetzlich limitierten Schadstoffe .....	27
4.1.3.	Einfluss der Kraftstoffe auf die Benzolemissionen (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ).....	32
4.1.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse zum Keramikträger-Katalysator .....	38
4.2.	Einfluss der Kraftstoffe auf die Emissionen des Katalysator mit Metallträger .....	40
4.2.1.	Einfluss der Kraftstoffe auf den Ausstoß von Distickstoffoxid (N <sub>2</sub> O) .....	40
4.2.2.	Einfluss der Kraftstoffe auf den Ausstoß der gesetzlich limitierten Schadstoffe .....	48
4.2.3.	Einfluss der Kraftstoffe auf den Ausstoß von Benzol (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ).....	53
4.2.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse zum Metallträger-Katalysator und Vergleich mit Keramikträger .....	56
4.3.	Bewertung der untersuchten Kraftstoffe .....	58
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>59</b>
<b>6.</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>63</b>
Anhang	.....	67
	Anhang A: Kraftstoffzusammensetzungen .....	67
	Anhang B: Geschwindigkeitsverläufe der Fahrprofile.....	69

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 3.1</b>	Versuchsaufbau.....	15
<b>Abbildung 4.1</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 4.....	22
<b>Abbildung 4.2</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 1.....	22
<b>Abbildung 4.3</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2.....	23
<b>Abbildung 4.4</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionsverlauf des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2.....	24
<b>Abbildung 4.5</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 3.....	24
<b>Abbildung 4.6</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger nach Straßentypen.....	25
<b>Abbildung 4.7</b>	Rückgang der N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für die reformulierten Kraftstoffe bezogen auf den Standardkraftstoff.....	26
<b>Abbildung 4.8</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 4.....	27
<b>Abbildung 4.9</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 1.....	28
<b>Abbildung 4.10</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2.....	29
<b>Abbildung 4.11</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 3.....	30
<b>Abbildung 4.12</b>	Mittelwerte der Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger über alle Straßentypen.....	31
<b>Abbildung 4.13</b>	Rückgang der Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für die reformulierten Kraftstoffe bezogen auf den Standardkraftstoff mit den Mittelwerten.....	32

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 4.14</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 4.....	33
<b>Abbildung 4.15</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 1.....	34
<b>Abbildung 4.16</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2.....	35
<b>Abbildung 4.17</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 3.....	36
<b>Abbildung 4.18</b>	Benzol-Emissionen des Keramik Katalysator nach Straßentypen.....	37
<b>Abbildung 4.19</b>	Mittelwerte der Benzol-Emissionen des Keramik Katalysator über alle Straßentypen.....	38
<b>Abbildung 4.20</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 4.....	40
<b>Abbildung 4.21</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 1.....	41
<b>Abbildung 4.22</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 2.....	42
<b>Abbildung 4.23</b>	Mittelwerte der N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger über alle Straßentypen.....	43
<b>Abbildung 4.24</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den ECE-EUDC Zyklus.....	43
<b>Abbildung 4.25</b>	Vergleich der N <sub>2</sub> O-Emissionen zwischen den Katalysatoren für den Standardkraftstoff gruppiert nach Strecken.....	44
<b>Abbildung 4.26</b>	Vergleich der N <sub>2</sub> O-Emissionsverläufe von Keramik- und Metallträger Katalysator für den Kraftstoff Standard und Straßentyp 4.....	46
<b>Abbildung 4.27</b>	Vergleich der N <sub>2</sub> O-Emissionsverläufe des Katalysator mit Metallträger für alle Kraftstoffe im ECE-EUDC Zyklus.....	47
<b>Abbildung 4.28</b>	Temperaturverlauf der Abgase nach Katalysator mit Metallträger für alle Kraftstoffe im ECE-EUDC Zyklus.....	48
<b>Abbildung 4.29</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 4.....	49

<b>Abbildung 4.30</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 1.....	50
<b>Abbildung 4.31</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 2.....	51
<b>Abbildung 4.32</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Metallträger für den ECE-EUDC Zyklus .....	52
<b>Abbildung 4.33</b>	Vergleich der Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe zwischen den Katalysatoren für den Standardkraftstoff.....	52
<b>Abbildung 4.34</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 4.....	54
<b>Abbildung 4.35</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 1 .....	54
<b>Abbildung 4.36</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den ECE-EUDC Zyklus .....	55
<b>Abbildung 4.37</b>	Vergleich der Benzol-Emissionen zwischen den Katalysatoren für den Standardkraftstoff gruppiert nach Strecken.....	56



## Abkürzungsverzeichnis

BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CVS	Constant Volume Sampling
ECE	Europäischer Testzyklus
EPEFE	European Programme on Emission, Fuels and Engine Technologies
EUDC	Außerstädtischer Anteil im Europäischen Testzyklus
FID	Flammen-Ionisations-Detektor
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer
MTBE	Methyl-Tertiär-Butyl-Ether
NDIR	Nichtdispersive Infrarot Analyse
ppbv	volume parts per billion
ppm	parts per million
RK 1	Reformulierter Kraftstoff Nr. 1
RK 2	Reformulierter Kraftstoff Nr. 2
ROZ	Research Oktanzahl
RVP	Reid Vapour Pressure
T90	Temperatur bei der 50% des Kraftstoffs verdampft ist [°C]
VOC	Volatile Organic Compounds (Flüchtige organische Verbindungen)

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 3.1</b>	Versuchsaufbau.....	15
<b>Abbildung 4.1</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 4.....	22
<b>Abbildung 4.2</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 1.....	22
<b>Abbildung 4.3</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2.....	23
<b>Abbildung 4.4</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionsverlauf des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2.....	24
<b>Abbildung 4.5</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 3.....	24
<b>Abbildung 4.6</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger nach Straßentypen.....	25
<b>Abbildung 4.7</b>	Rückgang der N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für die reformulierten Kraftstoffe bezogen auf den Standardkraftstoff.....	26
<b>Abbildung 4.8</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 4.....	27
<b>Abbildung 4.9</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 1.....	28
<b>Abbildung 4.10</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2.....	29
<b>Abbildung 4.11</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 3.....	30
<b>Abbildung 4.12</b>	Mittelwerte der Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger über alle Straßentypen.....	31
<b>Abbildung 4.13</b>	Rückgang der Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für die reformulierten Kraftstoffe bezogen auf den Standardkraftstoff mit den Mittelwerten.....	32

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 4.14</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 4.....	33
<b>Abbildung 4.15</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 1.....	34
<b>Abbildung 4.16</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2.....	35
<b>Abbildung 4.17</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 3.....	36
<b>Abbildung 4.18</b>	Benzol-Emissionen des Keramik Katalysator nach Straßentypen.....	37
<b>Abbildung 4.19</b>	Mittelwerte der Benzol-Emissionen des Keramik Katalysator über alle Straßentypen.....	38
<b>Abbildung 4.20</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 4.....	40
<b>Abbildung 4.21</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 1.....	41
<b>Abbildung 4.22</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 2.....	42
<b>Abbildung 4.23</b>	Mittelwerte der N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger über alle Straßentypen.....	43
<b>Abbildung 4.24</b>	N <sub>2</sub> O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den ECE-EUDC Zyklus.....	43
<b>Abbildung 4.25</b>	Vergleich der N <sub>2</sub> O-Emissionen zwischen den Katalysatoren für den Standardkraftstoff gruppiert nach Strecken.....	44
<b>Abbildung 4.26</b>	Vergleich der N <sub>2</sub> O-Emissionsverläufe von Keramik- und Metallträger Katalysator für den Kraftstoff Standard und Straßentyp 4.....	46
<b>Abbildung 4.27</b>	Vergleich der N <sub>2</sub> O-Emissionsverläufe des Katalysator mit Metallträger für alle Kraftstoffe im ECE-EUDC Zyklus.....	47
<b>Abbildung 4.28</b>	Temperaturverlauf der Abgase nach Katalysator mit Metallträger für alle Kraftstoffe im ECE-EUDC Zyklus.....	48
<b>Abbildung 4.29</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 4.....	49

<b>Abbildung 4.30</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 1.....	50
<b>Abbildung 4.31</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 2.....	51
<b>Abbildung 4.32</b>	Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Metallträger für den ECE-EUDC Zyklus .....	52
<b>Abbildung 4.33</b>	Vergleich der Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe zwischen den Katalysatoren für den Standardkraftstoff.....	52
<b>Abbildung 4.34</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 4.....	54
<b>Abbildung 4.35</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 1 .....	54
<b>Abbildung 4.36</b>	Benzol-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den ECE-EUDC Zyklus .....	55
<b>Abbildung 4.37</b>	Vergleich der Benzol-Emissionen zwischen den Katalysatoren für den Standardkraftstoff gruppiert nach Strecken.....	56

## Abkürzungsverzeichnis

BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CVS	Constant Volume Sampling
ECE	Europäischer Testzyklus
EPEFE	European Programme on Emission, Fuels and Engine Technologies
EUDC	Außerstädtischer Anteil im Europäischen Testzyklus
FID	Flammen-Ionisations-Detektor
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer
MTBE	Methyl-Tertiär-Butyl-Ether
NDIR	Nichtdispersive Infrarot Analyse
ppbv	volume parts per billion
ppm	parts per million
RK 1	Reformulierter Kraftstoff Nr. 1
RK 2	Reformulierter Kraftstoff Nr. 2
ROZ	Research Oktanzahl
RVP	Reid Vapour Pressure
T90	Temperatur bei der 50% des Kraftstoffs verdampft ist [°C]
VOC	Volatile Organic Compounds (Flüchtige organische Verbindungen)

# 1. Einleitung

Durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Öl, Kohle und Erdgas steigen weltweit die Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) an.

1992 wurden in der BRD 226.000 Tonnen Distickstoffoxid emittiert. Der Ausstoß zwischen 1990 und 1996 hielt sich jeweils konstant auf ungefähr diesem Niveau. Dies ist jedoch nur den sinkenden Emissionen im Bereich der Landwirtschaft zuzuschreiben, da im Bereich des Straßenverkehrs im gleichen Zeitraum steigende Distickstoffoxid-Emissionen zu verzeichnen waren. Diese Erhöhung ist auf die wachsende Zahl von Kraftfahrzeugen mit geregelterm Dreiwegekatalysator zurückzuführen, da diese Art der Abgasnachbehandlung bei Ottomotoren als unerwünschte Nebenreaktion Distickstoffoxid freisetzen kann.

Das Benzol ist ein weiterer Schadstoff, der in den Abgasemissionen von Kraftfahrzeugen vom Gesetzgeber nicht begrenzt ist. Es gehört zu den aromatischen Kohlenwasserstoffen und wird von Kraftfahrzeugen auf zweierlei Arten emittiert. Zum einen durch die im Abgas vorkommenden Anteile, zum anderen durch Verdunstungsemissionen. Durch geringere Anteile von Benzol im Kraftstoff sollen in Zukunft die Emissionen aus beiden Quellen gesenkt werden.

Das Vorhaben untersucht den Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung von vier unterschiedlichen Kraftstoffen auf den Schadstoffausstoß von Personenkraftwagen mit Ottomotor,  $\lambda=1$  Gemischregelung und Katalysator. Das Hauptinteresse gilt dabei den gesetzlich nicht limitierten Schadstoffen Distickstoffoxid und Benzol, jedoch werden auch die gesetzlich limitierten Schadstoffe in die Untersuchung mit einbezogen.

Auf dem Abgasrollenprüfstand des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart wurden mit jedem der vier untersuchten Kraftstoffe bestimmte Streckenverläufe simuliert. Die bei diesen Versuchen auf dem Prüfstand gefahrenen Profile stellen in Bezug auf Fahrtverlauf und Streckendaten für den Ballungsraum repräsentative Streckenabschnitte dar. Somit sind diese Profile sehr viel besser dazu geeignet, Aussagen über die in der Realität auftretenden Emissionen zu treffen als z. B. der gesetzliche ECE-EUDC Zyklus, welcher aus Abschnitten konstanter Beschleunigung, Geschwindigkeit und Verzögerungen besteht.

Die Abgase werden mit einer CVS-Anlage (Constant Volume Sampler) gesammelt und anschließend mit einem FTIR-Mehrkomponentenmessgerät ausgewertet. Zur Probennahme für die Analyse der Aromaten wird ein Teilstrom der in der CVS-Anlage verdünnten Abgase über Aktivkohleröhrchen geleitet. Die Emissionen von Distickstoffoxid werden online aufgezeichnet. Die Probennahme erfolgt an Messstellen vor und hinter dem Katalysator.

## Einleitung

Die Messungen sollen zum einen Aufschluss über das Emissionsverhalten bei Verwendung von Kraftstoffen unterschiedlicher Zusammensetzung, einschließlich sauerstoffhaltiger Komponenten geben und zum anderen Emissionsfaktoren eines „Clean Fuel“ für limitierte und nicht-limitierte Schadstoffemissionen in realen Fahrtverläufen eines Ballungsraumes liefern.

## 2. Emissionen von Kraftfahrzeugen

Durch unvollständige Verbrennung von Kraftstoffen in Motoren auch moderner Kraftfahrzeuge befinden sich in den Abgasen verschiedene Schadstoffe, die sich negativ auf die Umwelt auswirken. Hierzu gehören unverbrannte und teilverbrannte Kohlenwasserstoffe, thermische Crackprodukte und deren Folgeprodukte. Dazu kommen weitere Schadstoffe durch Kraftstoffzusätze und -verunreinigungen. Verstärkt werden die Emissionen durch Nebenprodukte aus der Verbrennung der in der natürlichen Luftzusammensetzung enthaltenen weiteren chemischen Stoffe. Weitere Emissionen treten bei der Verflüchtigung von Kraftstoffen durch Tankentlüftung und beim Tanken auf. Hinzu kommen schließlich Schadstoffe, die durch unerwünschte Reaktionen an der Oberfläche moderner Dreiwegekatalysatoren entstehen, die sogenannten Sekundäremissionen.

Beeinflusst werden die Abgasemissionen bei Verbrennungsmotoren durch motorische Gegebenheiten, Art und Umstand der Abgasnachbehandlung die Zusammensetzung der Kraftstoffe sowie durch Fahrverhalten und Streckenprofil.

Stand der Technik in der Abgasnachbehandlung ist die katalytische Reaktion durch den Dreiwegekatalysator mit Gemischregelung. Hier werden schädliche Komponenten im Abgas reduziert bzw. in weniger schädliche Stoffe umgewandelt.

Den Kraftstoffen und deren Zusammensetzung wird in den letzten Jahren zunehmend Aufmerksamkeit zuteil. Durch Beigaben bzw. Einschränkungen bestimmter Komponenten kann auch hier Einfluss auf die Emissionen genommen werden.

Das Fahrverhalten beeinflusst die Emissionen vor allem über den Kraftstoffverbrauch. Durch unnötige Beschleunigungsvorgänge kann der Verbrauch und somit auch die Emissionen steigen. Eng damit verbunden ist das gefahrene Streckenprofil, welches durch Steigungen beispielsweise für erhöhten Kraftstoffverbrauch verantwortlich ist.

### 2.1 Schadstoffe in Abgasen von Ottomotoren

Bei der Verbrennung von Kraftstoff unter Beteiligung der in der Verbrennungsluft enthaltenen Bestandteile entstehen unter anderem Schadstoffe, welche für Mensch und Natur in hohem Maße gefährlich sind. Dazu gehören: Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), die unter dem Namen Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) zusammengefassten Schadstoffe Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Kohlenwasserstoffe (HC) unter besonderer Beachtung des Benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) sowie das Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O).



### 2.1.1 Gesetzlich limitierte Schadstoffe in Abgasen von Kraftfahrzeugen mit Ottomotor

Seit 1970 werden Grenzwerte für bestimmte Autoabgase durch die Europäische Gemeinschaft<sup>1</sup> festgelegt und in unregelmäßigen Abständen verschärft.

Folgende Schadstoffe in den Abgasen sind vom Gesetzgeber limitiert:

- Kohlenmonoxid (CO)
- Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>)
- Kohlenwasserstoffe (HC)<sup>2</sup>

Die Entwicklung der Abgasgrenzwerte in der EU ist **Tabelle 2.1** zu entnehmen.

In Deutschland hat der Gesetzgeber mit dem Kraftfahrzeugsteueränderungsgesetz von 1997 finanzielle Anreize geschaffen, um diese Werte schon zu einem früheren Zeitpunkt einzuhalten.

**Tabelle 2.1:** Entwicklung der Abgasgrenzwerte für Ottomotoren [UMWELT (1998)]:

	<b>Zeitpunkt der Einführung</b>	<b>CO</b> [g/km]	<b>HC</b> [g/km]	<b>NO<sub>x</sub></b> [g/km]	<b>HC + NO<sub>x</sub></b> [g/km]
<b>Euro-1</b>	1993	3,16	---	---	1,13
<b>Euro-2</b>	1997	2,2	---	---	0,5
<b>Euro-3 (D3)</b>	2001	2,3 (1,5)	0,2 (0,17)	0,15 (0,14)	---
<b>Euro-4</b>	2006	1,0	0,1	0,08	---

Der Ausstoß der vom Gesetzgeber limitierten Schadstoffe ist, durch eben diese gesetzlichen Beschränkungen, häufig untersucht. Somit liegt diesbezüglich auch eine Fülle von Daten vor.

Besondere Aufmerksamkeit erhält in dieser Arbeit unter anderem das zu den Kohlenwasserstoffen gehörende Benzol. Benzol ist unter Normalbedingungen eine brennbare, farblose Flüssigkeit, welche durch ihren hohen Dampfdruck in abgasbürtigen Emissionen und der Umgebungsluft gasförmig vorliegt.

Hauptemissionsquelle von Benzol ist der Kraftfahrzeugverkehr. Dabei können in diesem Bereich zwei Quellen ausgemacht werden. Zum Ersten stammen die Benzol-Emissionen aus den Abgasen der Kraftfahrzeuge, hier vor allem aus unverbrannten aromatischen Kohlenwasserstoffen im Kraftstoff. Die zweite Quelle in diesem Bereich stellen die

---

<sup>1</sup> Inzwischen Europäische Union

<sup>2</sup> Im Rahmen der Anpassung an die internationale Norm ist der Begriff der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) eingeführt worden, die unter diesem Begriff zusammengefassten Stoffe entsprechen weitgehend denen der Kohlenwasserstoffe.

Verdunstungsemissionen von Benzol dar. Diese treten vor allem beim Umfüllen von Kraftstoffen in Raffinerien und an Tankstellen auf, jedoch auch bei der Verdunstung aus Kraftstoffbehältern der Kraftfahrzeuge, aus Vergasern und Einspritzanlagen. Das Ausmaß der Emissionen von Benzol zeigt **Tabelle 2.2**.

Durch den Einbau von Aktivkohlefiltern werden die Verdunstungsemissionen bei Kraftfahrzeugen der neuen Generation inzwischen stark reduziert. Ebenso wird versucht, die Abgasemissionen durch Verringerung des Benzolgehalts im Ottokraftstoff auf einen Wert von max. 1 Vol.-% zu reduzieren.

**Tabelle 2.2:** Kfz- bedingte Benzol-Emissionen in der BRD 1995

<b>Emissionsquelle</b>	<b>Benzolemission [t/a]</b>
<i>Kraftfahrzeuge</i>	
Abgas Pkw	21.506
Verdunstung Pkw mit Ottomotor	1.765
<i>Verteilung</i>	
Lagerung, Umschlag, Transport, Tankstelle	169
Betankung Kfz	231
<b>Gesamt</b>	<b>23.671</b>

Quelle: Umweltbundesamt 1997 (Auszug)

Benzol ist für den Menschen toxisch und hat eine kanzerogene Wirkung. Ein Grenzwert, unter dem eine gesundheitliche Gefährdung auszuschließen ist, kann nicht angegeben werden [GSF (1999)].

### **2.1.2 Gesetzlich nicht limitierte Schadstoffe in Abgasen von Kraftfahrzeugen mit Ottomotor**

Seltener in der Literatur zu finden sind Schadstoffe, für deren Ausstoß es keine Begrenzungen gibt. Hierzu gehören vor allem auch die als Treibhausgase mehr oder weniger gut bekannten Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O). 1990 betragen die Emissionen dieser Gase in Deutschland zusammen 1.003 Mio. t, weltweit wurden im gleichen Jahr 22.100 Mio t in die Luft ausgestoßen. Diese Gase lassen die Sonnenstrahlung weitgehend ungehindert durch die Atmosphäre auf die Erde passieren, absorbieren jedoch die von der Erde reflektierte Wärmestrahlung, wodurch sich das Klima auf der Erde erwärmt [UBA-2(1999)]. Für dieses Vorhaben ist das Distickstoffoxid von besonderer Bedeutung. Deshalb soll es hier eingehender vorgestellt werden.

## Emissionen von Kraftfahrzeugen

Distickstoffoxid ist ein farbloses, reaktionsträges, diamagnetisches Gas, welches in den unteren Atmosphärenschichten inert ist. Klimarelevant ist das  $N_2O$  in zweierlei Hinsicht:

### *Abbau der Ozonschicht*

Durch Mischprozesse in höhere Atmosphärenschichten transportiert, wird es dort durch die solare UV Strahlung abgebaut, wobei mit Stickstoffmonoxid (NO) eine sehr aggressive Substanz entsteht. Dies bewirkt einen Abbau der natürlichen Ozon-Konzentration in der Stratosphäre [MANN (1997)]. Die Ozonschicht in dieser Höhe bildet das natürliche Schutzschild der Erde gegen die, für den Menschen langfristig tödlich wirkende kurzwellige UV Strahlung der Sonne.

### *Beitrag zum Treibhauseffekt*

Der Beitrag des Distickstoffoxid zum Treibhauseffekt beträgt ca. 5% [GIFHORN & MEYER-PITROFF (1998)]. Besondere Aufmerksamkeit gebührt dem  $N_2O$  vor allem durch die Tatsache, dass ein Mol dieses Gases einen ca. 270-mal größeren Beitrag zum Treibhauseffekt leistet als die gleiche Menge  $CO_2$ .

Der Anteil von Distickstoffoxid in der Atmosphäre stieg von 1800 mit einer Konzentration von 265 ppbv auf 310 ppbv im Jahr 1992. Dies bedeutet eine Erhöhung von 0,7 ppbv/a, das sind 15%. Die Gründe für die Zunahme der  $N_2O$ -Konzentration in der Atmosphäre sind vielfältig. Sie liegen im starken Anstieg der Verbrennung fossiler Energieträger wie Öl, Kohle oder Erdgas ebenso wie in der Ausweitung der industriellen Produktion, in Änderungen bei der Landnutzung oder bei der Ausweitung der Viehwirtschaft [UBA-2 (1999)].

Wie **Tabelle 2.3** zeigt, liegen die Emissionen von Distickstoffoxid 1996 etwa auf dem Niveau des Jahres 1990. Die Emissionsminderung im Bereich der Landwirtschaft um 11.000 t wurde durch einen Zuwachs der Emissionen des Straßenverkehrs kompensiert. Diese Steigerung der  $N_2O$ -Emissionen im Straßenverkehr ist vor allem auf die steigende Anzahl von Fahrzeugen mit Dreiwegekatalysator zurückzuführen. Diese sind gemäß neuester Erkenntnisse mit 3% - 7% an der anthropogenen  $N_2O$ -Emission beteiligt. Während sich bei Fahrzeugen mit Ottomotor ohne Katalysator eine  $N_2O$ -Konzentration von lediglich ca. 5 mg/km einstellt, steigt dieser Wert bei Fahrzeugen mit Katalysator auf 25 - 50 mg/km an [GIFHORN & MEYER-PITROFF (1998)]. Mit der Laufleistung dieser Fahrzeuge, und damit der Gebrauchsdauer der Katalysatoren, können sich die Emissionswerte noch weiter erhöhen [SJÖDIN et al. (1995)].

**Tabelle 2.3:** Emissionen von N<sub>2</sub>O in Deutschland 1990 – 1996 in Mio. t

	1990	1991	1992	1993*)	1994*)	1995*)	1996*)
<b>Land- und Abfallwirtschaft</b>	<b>100</b>	<b>91</b>	<b>87</b>	<b>85</b>	<b>90</b>	<b>89</b>	<b>89</b>
Produktverwendung	6	6	6	6	6	6	6
Industrieprozesse	82	84	93	84	81	82	87
<b>Verkehr</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>21</b>	<b>22</b>
Haushalte	3	4	3	4	4	4	4
Kleinverbraucher	2	2	2	2	2	2	2
Industriefeuerungen	6	6	5	5	5	5	5
Kraft- und Fernheizwerke	15	14	14	13	13	13	13
<b>Gesamt</b>	<b>226</b>	<b>220</b>	<b>226</b>	<b>218</b>	<b>219</b>	<b>222</b>	<b>228</b>

\*) vorläufige Angaben

Quelle: Umweltbundesamt 1997

## 2.2 Der Einfluss von Katalysatoren auf die Emissionen

Es gibt drei Systeme der nichtselektiven katalytischen Abgasreinigung [ROBERT BOSCH GMBH (1997)]:

- Oxidationskatalysator: Er wandelt Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid in Wasserdampf und Kohlendioxid um. Stickstoffoxide können mit ihm praktisch nicht verringert werden.
- Doppelbettkatalysator: In zwei hintereinandergeschalteten Katalysatoren werden Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe umgesetzt. Es entsteht hierbei im ersten Katalysator jedoch Ammoniak (NH<sub>3</sub>), das unter Luftzugabe wieder zu Stickstoffoxiden aufoxidiert wird.
- Dreiwegekatalysator mit Lambda-Regelung: Bei diesem System werden alle drei Schadstoffkomponenten (CO, NO<sub>x</sub>, HC) in hohem Maße entfernt.

Dreiwegekatalysatoren erfordern für eine hohe Umsatzrate aller drei Schadstoffgruppen Kohlenwasserstoffen, Stickstoffoxiden und Kohlenmonoxid ein stöchiometrisches Kraftstoff-Luft-Verhältnis. Auf einem Trägermaterial (Monolith) aus Schüttgut, Keramik oder Metall befindet sich eine aktive Zwischenschicht aus Aluminiumoxid (wash-coat)<sup>3</sup>. Diese Schichten vergrößern die wirksame Oberfläche des Katalysators um etwa den Faktor 7000 [ROBERT

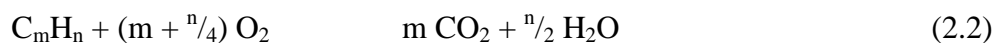
<sup>3</sup> Bei Monolithen aus Schüttgut entfällt diese Zwischenschicht.

BOSCH GMBH (1997)]. Die auf diese Fläche aufgebrachte katalytische Schicht kann aus den Edelmetallen Platin, Iridium oder Palladium für die Oxidation, sowie Rhodium für die Reduktion bestehen. Da die Luftzahl bei den Vorgängen im Katalysator eine entscheidende Rolle spielt, ist für dieses Konzept eine Gemischregelung erforderlich.

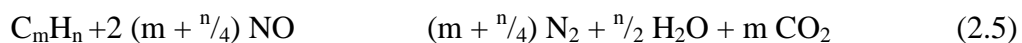
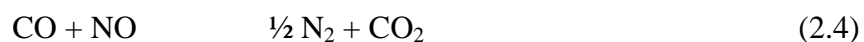
### 2.2.1 Reaktionen der gesetzlich limitierten Schadstoffe an der Katalysatoroberfläche

Durch den Einsatz von Dreiwegekatalysatoren mit Gemischregelung kann der Ausstoß der drei limitierten Schadstoffkomponenten in Abgasen um über 90 % reduziert werden. Folgende Prozesse laufen hierbei ab [VAN BASSHUYSEN & SCHÄFER (1997)]:

*Oxidation von Schadstoffen und brennbaren Anteilen:*



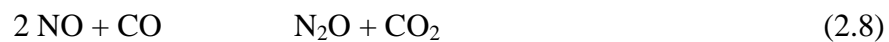
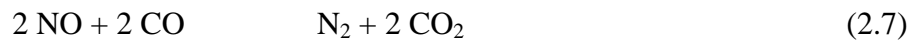
*Reduktion von Stickoxiden:*



Die Oxidation an der Katalysatoroberfläche wandelt nach Gleichung (2.1) das Kohlenmonoxid in Kohlendioxid um. Gleichung (2.2) zeigt die Reaktion der Kohlenwasserstoffe mit Sauerstoff in Kohlendioxid und Wasser. Die Reduktion von Kohlenmonoxid und Stickstoffmonoxid in Stickstoff und Kohlendioxid ist in Gleichung (2.4) dargestellt. Die Reduktion von Stickstoffmonoxid mit den Kohlenwasserstoffen zeigt Gleichung (2.5). Der Einfluss von Wasserstoff auf die Vorgänge an der Katalysatoroberfläche wird von den Gleichungen (2.3) und (2.6) aufgezeigt.

### 2.2.2 Bildung von Distickstoffoxid im Katalysator

Neben den gewünschten Oxidations- und Reduktionsreaktionen finden im Katalysator auch unerwünschte Reaktionen statt. Diese führen zu Sekundäremissionen, zu welchen auch diejenigen des  $\text{N}_2\text{O}$  gehören. Die für die Konvertierung des  $\text{N}_2\text{O}$  wichtigen Reaktionen werden in folgenden Gleichungen dargestellt [VAN BASSHUYSEN & SCHÄFER (1997)]:



Gleichung (2.7) zeigt die gewünschte Reaktion von Stickstoffmonoxid und Kohlenmonoxid zu Stickstoff und Kohlendioxid. Dies geschieht bei hohen Temperaturen. Unerwünscht ist hingegen das in Gleichung (2.8) dargestellte Entstehen von Distickstoffoxid aus Stickstoffmonoxid und Kohlenmonoxid bei niedrigen Temperaturen. Gleichung (2.9) stellt die Abbaureaktion des Distickstoffoxids mit dem Reduktionsmittel Kohlenmonoxid dar, Gleichung (2.10) beschreibt den Zerfall von  $\text{N}_2\text{O}$  in seine Elemente. Alle hier dargestellten Reaktionen hängen von der Edelmetallbelegung des Katalysators, der Volumengeschwindigkeit des Abgases, der Luftzahl, dem Verhältnis  $\text{NO}/\text{CO}$  sowie dem Alter und der Temperatur des Katalysators ab. Den größten Einfluss der genannten Faktoren haben die Temperatur und das Alter bzw. die Laufleistung des Katalysators [MANN (1997)]. Da dieser zur Konvertierung eine bestimmte Temperatur benötigt, werden in den ersten Minuten nach einem Kaltstart die Schadstoffe weitgehend ungereinigt in die Atmosphäre entlassen. Erst bei einer Temperatur von ca.  $250^\circ\text{C}$  beginnt die Konvertierung. Das Verhalten bezüglich der Bildung von  $\text{N}_2\text{O}$  unterliegt anderen Gesetzmäßigkeiten. Die Abbaureaktion nach Gleichung (2.9) beginnt bei einer Temperatur von ca.  $150^\circ\text{C}$ , die Dissoziation nach Gleichung (2.10) beginnt erst bei ca.  $350^\circ\text{C}$  in nennenswerter Form. Um  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen zu verringern bestehen grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten:

- Motorische Maßnahmen
- Maßnahmen in der Abgasnachbehandlung
- Maßnahmen bei Kraftstoffen

### 2.3 Der Einfluss von Kraftstoffen auf die Emissionen

Kraftstoffe für Ottomotoren (Normal, Super, Super Plus) können sich erheblich in ihrer Zusammensetzung von ca. 200 Kohlenwasserstoffen unterscheiden. Selbst bei den einzelnen Kraftstoffsorten können herstellerepezifische Unterschiede auftreten. Ursache hierfür sind die in den Normen festgelegten Mindest- und Höchstmengen für verschiedene Stoffe. Dies erlaubt den

Herstellern den auf bestimmte Ziele hin optimierten Kraftstoff zu entwickeln. Diese Ziele wie z.B. Erhöhung der Oktanzahl, Korrosionsschutz, Vereisungshemmung, Verbesserung der Verbrennung, Verbrauchsreduzierung und Schutz vor Ventilverschleiß werden zum Teil durch sogenannte Additive erreicht. Begrenzt werden Additivierungen nur durch die gesetzlichen Vorschriften der limitierten Emissionen und den Normen für Kraftstoffe. Auswirkungen haben diese Maßnahmen vor allem auf das Fahrverhalten, den Verschleiß, die Motorleistung und auf die Abgas-Emissionen.

### **2.3.1 Anstrengungen zur Luftreinhaltung**

In den USA wird der Einfluss von Kraftstoffen auf die Emissionen schon seit längerem genutzt um den verkehrsbedingten Schadstoffausstoß noch weiter zu reduzieren. Mit den "Clean Air Act Amendments" der US- Umweltbehörde EPA und dem "California Air Resources Board" (CARB) im US-Staat Kalifornien existieren seit Anfang der 90er Jahre 2 Programme zur Luftreinhaltung mit dem Schwerpunkt auf der Reformulierung von Kraftstoffen.

In Europa existiert ein Abkommen mit ähnlicher Zielsetzung, das "Europäische Programm über Emissionen, Kraftstoffe und Motortechnologien" (EPEFE). Diese Strategie europäischer Automobilhersteller (European Automobile Manufacturers Association – ACEA), der europäischen Mineralölindustrie (European Petroleum Industry Association – Europa) und der EU von 1993 mit zunächst einem '*...2 Jahresprogramm zur Untersuchung der Auswirkungen der Kraftstoffspezifikationen und der Motortechnologien auf die Abgasemissionen der KFZ ...*' zeigt, dass in Europa ebenfalls Anstrengungen vorhanden sind, verkehrsbedingte Emissionen auch mit neuen Kraftstoffzusammensetzungen zu verringern. [BRUNNER & LEPEU (1994) / BECKER (1996)]. Im ersten Teil des EPEFE-Programms wurden vor allem Literaturstudien zum Thema gemacht um eine Datenbasis zu bekommen.

Die Europäische Kommission hat inzwischen ein "Auto-Oil II Programme" initiiert um die Forschung weiter voran zu treiben. Ziel ist die Verringerung der verkehrsbedingten Schadstoffe von 1996 bis 2010 um 70 %.

### **2.3.2 Reformulierte Kraftstoffe**

Benzin (Ottokraftstoff) ist ein Mix aus über 200 verschiedenen Kohlenwasserstoffen des Rohöls. Die Zusammensetzung von Benzin mit Mindest- und Höchstmengen ist in DIN EN 228 geregelt. Kohlenwasserstoffe im Benzin sind vor allem Paraffine, Olefine und Aromaten. Dazu kommen sauerstoffhaltige Verbindungen als Bleiersatz sowie Schwefel. Tabelle 1 in Anhang A zeigt die typische Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe in handelsüblichen Kraftstoffen.

Die Reformulierung von Kraftstoffen bedeutet eine Veränderung der Kraftstoffzusammensetzung mit dem Ziel, das Abgasverhalten von Verbrennungsmotoren mit Katalysator weiter zu verbessern.

In den USA wurden im Zuge der 'Verbesserung' von Kraftstoffen zwei Kategorien gesetzlich kontrollierter Kraftstoffe definiert, Sauerstoffangereicherte und Reformulierte Kraftstoffe [MANN (1997)].

- Sauerstoffangereicherte Kraftstoffe (Oxyfuels) definieren sich als solche mit einem Sauerstoffgehalt von mindestens 2.7 Vol.-%.
- Reformulierte Kraftstoffe schreiben bestimmte Werte für Benzol (< 1 Vol.-%), Sauerstoff (> 2 Vol.-%), Sommer RVP (50 – 57 kPa), Schwefel (< 20 ppm), T90, Olefine (< 5 Vol.-%) und Aromaten (< 25 Vol.-%) vor.

In der Europäischen Union sieht die Richtlinie 98/70/EG über die "Qualität von Otto- und Dieselmotoren" ab 2000, in Ausnahmefällen zwingend ab spätestens 2005, bestimmte Mengen und Eigenschaften für folgende Stoffe vor [BECKER (1996) / NIERHAUVE (1996) / EU-2 (1999)]:

Oktanzahl, Sommer RVP (< 60 kPa), Siedeverlauf und Gehalt an Aromaten (< 45 Vol.-%), Benzol (< 2 Vol.-%), Olefinen (<18 Vol.-%)<sup>4</sup>, Sauerstoff (< 2 Gew.-%), sauerstoffhaltige Komponenten, Schwefel (< 200 ppm)<sup>5</sup> und Blei (< 0,005 g/l).

### **2.3.3 Auswirkungen der Kraftstoffbestandteile auf die Emissionen der gesetzlich limitierten Schadstoffe**

Die verschiedenen Bestandteile der Kraftstoffe beeinflussen die Emissionen bei der Verbrennung und anschließenden Reinigung im Katalysator [BECKER (1997) / KÖNIG et al. (1996) / MANN (1997)].

#### *Aromatische Kohlenwasserstoffe (Aromaten)*

Wird der Anteil von Aromaten in Kraftstoffen reduziert, führt das zu einer Verringerung der Oktanzahl. Diese muss durch andere Maßnahmen wieder angehoben werden. Das kann durch den Zusatz einer sauerstoffhaltigen Verbindung (Methyl-Tertiär-Butyl-Ether (MTBE) oder Alkohol) geschehen. Daraus resultiert eine Verringerung der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxid im Abgas, jedoch kann sich im Gegenzug ein Anstieg der Stickstoffoxide einstellen [MANN (1997)].

---

<sup>4</sup> Nur bei Super-Kraftstoff. Bei Normal-Kraftstoff < 21 Vol.-%.

<sup>5</sup> Neueste Werte sind < 50 ppm.



## Emissionen von Kraftfahrzeugen

Eine Verringerung des Benzolgehalts im Kraftstoff führt zu geringeren Benzol-Emissionen, sowohl im Abgas, als auch bei der Verdunstung. Der Zusammenhang zwischen dem Benzol im Kraftstoff und dem Anteil von Benzol in den Abgas-Emissionen ist jedoch nicht proportional, da auch die restlichen Aromaten nicht unerheblich an der Benzol-Emission im Abgas beteiligt sind. Das Benzol im Kraftstoff trägt jedoch um bis zu 12-mal mehr zu den Emissionen bei als die restlichen aromatischen Kohlenwasserstoffe [MANN (1997)].

### *Olefine*

Die Verringerung des Olefingehalts führt zu einer Verringerung der Emissionen von Stickstoffoxiden. Die Werte für die Kohlenwasserstoffe im gereinigten Abgas steigen jedoch an. Auf das Kohlenmonoxid haben die Olefine keinen Einfluss, der Wert für diesen Schadstoff bleibt unverändert [BECKER (1996)].

### *Sauerstoffhaltige Komponenten*

Sauerstoffhaltige Komponenten ersetzen üblicherweise die Aromaten. Daraus folgt zuerst eine Verringerung der Kohlenwasserstoff-Emissionen bei der Zugabe dieser Komponenten. Jedoch steigt der Ausstoß anderer toxischen Schadstoffe (Butadien, Formaldehyd, Acetaldehyd) an. Die Zugabe von sauerstoffhaltigen Komponenten bewirkt darüber hinaus eine deutliche Verringerung der Kohlenmonoxid-Emissionen. Die Emissionen von Stickstoffoxiden hingegen steigen vermutlich durch den Sauerstoffüberschuss im Abgas und der daraus resultierenden Verschlechterung der Reduktion dieses Bestandteils im Abgas an [OTTER et al. (1993) / UBA-2 (1999)]<sup>6</sup>.

### *Schwefel*

Bei der Verbrennung des sich im Kraftstoff befindenden Schwefels entsteht Schwefeltrioxid (SO<sub>3</sub>) welches durch die Bildung von Oberflächenoxiden zur Deaktivierung des Katalysators führt. Durch einen geringeren Schwefelgehalt im Kraftstoff wird dieser Effekt verringert und damit die Leistungsfähigkeit des Katalysator erhalten. Die Verringerung des Schwefelgehalts im Kraftstoff führt somit indirekt zu einer Absenkung der limitierten Schadstoffe HC, CO und NO<sub>x</sub> bzw. verhindert höhere Emissionen dieser Komponenten.

### *RVP und T90*

Eine Reduzierung dieser Eigenschaften würde die flüchtigen organischen Komponenten begrenzen. Da dies jedoch nur bei Altfahrzeugen ohne Katalysator und Aktivkohle-Kanistern eine Verbesserung bewirkt, ist dies eine wenig sinnvolle Maßnahme, da diese

---

<sup>6</sup> Da die Zugabe sauerstoffhaltiger Komponenten vor allem durch die Verringerung des Gehalts der aromatischen Kohlenwasserstoffe angezeigt ist, sollten die hier aufgezeichneten Veränderungen nicht ursächlich der Zugabe sauerstoffhaltiger Komponenten, sondern vielmehr der Verringerung der Aromaten zugeschrieben werden. Zumindest in der Literatur ist dieser Punkt nicht ausdrücklich hervorgehoben oder diskutiert.

Fahrzeuggeneration (zumindest in Deutschland) in absehbarer Zeit keine entscheidende Rolle mehr spielt.

## **2.4 Auswirkungen der Kraftstoffbestandteile auf die Emissionen von Distickstoffoxid**

Eine Reduktion der Aromaten im Kraftstoff bewirkt den Anstieg von Methan im Rohabgas. Das hat unmittelbaren Einfluss auf die Konvertierung der Stickstoffoxide und somit auch auf die N<sub>2</sub>O-Bildung im Katalysator. Eine Aromatenreduktion sorgt somit für einen Anstieg der N<sub>2</sub>O-Emissionen [KOSTKA & GRAUPNER (1996)].

Der Sauerstoffgehalt im Kraftstoff wirkt sich vor allem auf die Rohabgase aus. Versuche haben gezeigt, dass die N<sub>2</sub>O-Konzentration bei Kraftstoffen mit einem Anteil von 14,8 Gew.-% MTBE um den Faktor 6 ansteigen. Dies allerdings bei  $\lambda=0,975$  und stationärem Betrieb ( $n = 3000$  U/min;  $p_e = 4$  bar). Auf das gereinigte Abgas hat der Zusatz von MTBE gemäß dieser Untersuchung keinen Einfluss [FREY (1993)].

Insgesamt ist die Datenlage zu diesem Punkt sowie insgesamt zur Forschung bezüglich der N<sub>2</sub>O-Emissionen schlecht und zum Teil auch widersprüchlich, was vor allem an den unterschiedlichen und meist nicht vergleichbaren Untersuchungsschwerpunkten und -bedingungen liegt.





bestimmten Streckenverlaufs zur Verfügung gestellt, die vom Fahrerleitsystem ausgegeben werden. Die Regelelektronik simuliert die Fahrwiderstände über die Bremse und erzeugt über die Lauftrommeln die gewünschte Last am Fahrzeug. Das Leitsystem zeigt dem Fahrer auf einem Bildschirm das zu fahrende Streckenprofil in Form einer Sollgeschwindigkeit und der Getriebefahrstufe.

Die Kraftstoffzufuhr erfolgt über ein externes System mit Kraftstoffwaage. Das Abgas wird nach Verdünnung mit Umgebungsluft der CVS-Anlage zugeführt. Vor dieser Anlage werden die Proben für den Gaschromatographen entnommen. Die von der CVS-Anlage in Beuteln gesammelten Abgase werden nach Ende eines Versuchs mit Abgasmessgeräten (FTIR, FID) analysiert. Die Probeentnahme für die Online-Messung mit dem Infrarotspektrometer erfolgt direkt vor bzw. nach dem Katalysator.

## 3.2 Messtechnik

### 3.2.1 Temperaturmessung

Um das Temperaturverhalten zu bestimmen, wurden vor und nach dem Katalysator Temperaturmessstellen angebracht um die Abgastemperatur zu messen.

### 3.2.2 Probenanalyse

Die Analyse der Beutelmessung erfolgt mit einem FTIR (Fourier transformierte Infrarot Analyse). Die Ergebnisse der Analyse werden in ein am FKFS entwickeltes Computerprogramm eingegeben. Hinzu kommen die Daten der CVS-Anlage während der Messung sowie die Umgebungsdaten. Das Programm verarbeitet diese Daten und ermittelt den Schadstoffausstoß in Masse/km.

Die Analyse der Proben für den Gaschromatographen erfolgt am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfesselwesen (IVD). Hier werden die Emissionen der Aromaten, vor allem die des Benzol ermittelt.

Die Analyse der Online-Probeentnahme von  $N_2O$ , CO und  $CO_2$  erfolgt mit einem Infrarotspektrometer<sup>6</sup>. Diese Messwerte werden direkt von einem Computer gespeichert.

---

<sup>6</sup> Die Online aufgezeichneten Werte der Komponenten CO und  $CO_2$  sind zur Berücksichtigung der Querempfindlichkeit der  $N_2O$ -Messung.

### 3.3 Messprogramm

Das Messprogramm besteht aus Messungen der Kraftstoffe in Kombination mit den unterschiedlichen Streckenprofilen an den zwei beschriebenen Katalysatoren.

Als Versuchsfahrzeuge wurden zwei VW Golf-IV verwendet. Die Fahrzeuge sind mit neuester Abgasminderungstechnik ausgerüstet und erfüllen die Anforderungen nach Euronorm D3. Die unterschiedliche Laufleistung der beiden Fahrzeuge mit ca. 19000 km bzw. ca. 3000 km (siehe **Tabelle 3.1**) wurde in der Auswertung berücksichtigt.

Die Abgasreinigungsanlage der Fahrzeuge besteht aus Vorkatalysator und Hauptkatalysator, die Stelle der Probenahme "vor Katalysator" befindet sich "vor Hauptkatalysator".

**Tabelle 3.1:** Technische Daten der Versuchsfahrzeuge

	Versuchsfahrzeuge	
	Golf Nr. 1	Golf Nr. 2
Hubraum	1390 cm <sup>3</sup>	1390 cm <sup>3</sup>
Leistung	55 KW	55 KW
Bei	5000 U/min	5000 U/min
Leergewicht	1199 kg	1180 kg
Abgasnachbehandlung	Geregelter Drei-Wege-Katalysator	Geregelter Drei-Wege-Katalysator
Fahrleistung	~ 19000 km	~ 3000 km

Die unterschiedlichen Massen der Fahrzeuge wurden bei der Programmierung der Schwungmasse des Rollenprüfstandsrechners aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht berücksichtigt.

#### 3.3.1 Die untersuchten Kraftstoffe

Zur Erfüllung zukünftiger Grenzwertstufen muss der Kraftstoff einen Beitrag liefern. Dabei stehen nicht mehr ausschließlich die limitierten Schadstoffe im Vordergrund. Vielmehr muss versucht werden, auch nicht limitierte Schadstoffe in Autoabgasen zu reduzieren.

Zur Darstellung der Einflüsse einzelner Kraftstoffkomponenten auf das Emissionsverhalten wurde eine Matrix an Kraftstoffen zusammengestellt, die sich in den Anteilen der interessierenden Komponenten deutlich unterscheiden. So weisen die Kraftstoffe bei den

Aromaten und hier separat betrachtet für Benzol und für den Kraftstoffzusatz MTBE (Methyltertiärbutylether) unterschiedliche Anteile auf.

Bei allen vier Kraftstoffen handelt es sich um unverbleiten Superkraftstoff ROZ 95:

- Kraftstoff Nr. 1 ist der in Deutschland handelsübliche Super Kraftstoff. Er dient als Referenz und wird im folgenden als **Standard** Kraftstoff bezeichnet. Er hat einen hohen Aromatengehalt, darunter Benzol mit 2,35 Vol.-%. Der Kraftstoff enthält kein MTBE.
- Kraftstoff Nr. 2 ist der in Kalifornien regulär erhältliche reformulierte Kraftstoff RFG **Phase 2**. Der geringe Aromatengehalt von 23,7 Vol.-% wird ausgeglichen durch einen hohen Gehalt an MTBE, 11,2 Vol.-%.
- Kraftstoff Nr. 3 ist ein in der Zusammensetzung für diese Versuche hergestellter Kraftstoff. Er wird mit **RK 1** bezeichnet. Er ist stark angereichert mit MTBE (13,7 Vol.-%) und hat mit 44 Vol.-% einen hohen Aromatengehalt. Bei diesem Kraftstoff bezieht sich die Reformulierung auf die sauerstoffhaltige Verbindung.
- Kraftstoff Nr. 4 ist ebenfalls ein für diese Versuche modifizierter Kraftstoff. Die Bezeichnung für diesen ist **RK 2**. Der Aromatengehalt ist auf 24,7 Vol.-% reduziert und er enthält kein MTBE.

Eine exakte Analyse der reformulierten Kraftstoffe ist in Tabelle 2 in Anhang A ersichtlich. **Tabelle 3.2** zeigt die wichtigsten Unterschiede der vier Kraftstoffe in Bezug auf die Kohlenwasserstoffe und das MTBE übersichtlich auf<sup>7</sup>.

**Tabelle 3.2:** Wichtigste Unterschiede in der Zusammensetzung der Kraftstoffe

	Einheit	Standard	Phase 2	RK 1	RK 2
<b>Paraffine</b>	Vol.-%	~ 49,20	35,00	49,30	70,90
<b>Aromaten</b>	Vol.-%	~ 40,00	<b>23,70</b>	<b>44,00</b>	<b>24,70</b>
<b>Benzol *)</b>	Vol.-%	2,35	0,92	0,05	0,06
<b>Olefine</b>	Vol.-%	~ 9,70	5,80	6,70	4,40
<b>MTBE</b>	Vol.-%	0,00	<b>11,20</b>	<b>13,70</b>	< 0,10

\*) Analysiert am IVD

<sup>7</sup> Werte für Standardkraftstoff sind Mittelwerte der Zusammensetzung von Super Kraftstoff von 40 Tankstellen in Deutschland (ARAL-Forschung).

### 3.3.2 Die verwendeten Katalysatoren

Neben der Beschichtung der Katalysatoren kann auch das Trägermaterial einen nicht unwesentlichen Einfluss auf die Emissionen haben. So wird der größte Teil des Schadstoffs  $N_2O$  der Autoabgase im Katalysator produziert<sup>8</sup>. Diese Sekundäremissionen sind in höchstem Maße unerwünscht und müssen so weit als möglich reduziert bzw. verhindert werden. Da der Hauptteil dieser Emissionen in einem bestimmten Temperaturfenster kurz nach einem Kaltstart produziert wird, muss versucht werden, die Betriebstemperatur möglichst schnell zu erreichen. Ein Metallträgerkatalysator hat aufgrund seiner geringeren Wärmekapazität Vorteile gegenüber einem Katalysator mit Keramik als Trägermaterial. Ziel des Vorhabens ist die Klärung, unter welchen Umständen ein Katalysator mit Metallträger durch sein unterschiedliches Wärmeleitverhalten die  $N_2O$ -Emissionen zu senken in der Lage ist. Weiter soll herausgefunden werden, ob bei bestimmten Fahrprofilen mit sehr niedriger Motorlast der Katalysator mit Metallträger bei geringen Abgastemperaturen seine Konvertierungsrate ändert und eventuell in das für die  $N_2O$ -Entstehung ungünstige Temperaturfenster rutscht.

Die Versuchsreihe umfasst die Untersuchung von zwei Katalysatoren, beide haben eine Platin/Rhodium-Beschichtung. Folgende Katalysatoren werden untersucht:

- Originalkatalysator des Fahrzeugs mit Keramikträger.
- Katalysator mit Metallträger.

Katalysatoren mit Monolithen aus Metall werden in dieser Fahrzeugklasse selten verbaut. Der in Größe und Zellenzahl zum Hubraum der Fahrzeuge passende Metallträgerkatalysator wurde für die Untersuchung freundlicherweise von der Firma Paul Wurm GmbH zur Verfügung gestellt. Der hier verwendete Katalysator war beim Einbau in das Versuchsfahrzeug neu.

### 3.3.3 Die Testzyklen

Die Versuche umfassen fünf verschiedene Fahrstrecken. Neben dem Europäischen Zyklus ECE-EUDC werden noch vier reale Fahrkurven untersucht. Diese sind für den Ballungsraum Stuttgart typische Streckenverläufe und beinhalten die wichtigsten Verkehrszustände, die in einem Ballungsraum auftreten. Folgende Streckenverläufe werden untersucht:

- ECE-EUDC
- Straßentyp 1: innerörtliche Schnellstraße mit zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung, baulich getrennt, Höchstgeschwindigkeit 80 km/h (B 10)

---

<sup>8</sup> Vgl. Gleichungen (2.7) und (2.8)



- Straßentyp 2: Aufbau wie 1, jedoch zusätzlich mit Straßenkreuzungen mit Lichtsignalen und einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h (B 14).
- Straßentyp 3: ein Fahrstreifen pro Fahrtrichtung, Höchstgeschwindigkeit 50 km/h, Steigungen werden berücksichtigt (neue Weinsteige)
- Straßentyp 4: Tempo-30-Zone in einem Wohngebiet

Die Geschwindigkeitsprofile der einzelnen Strecken sind in den Abbildungen im Anhang B dargestellt, die spezifischen Eigenschaften der Straßentypen finden sich in **Tabelle 3.3**.

**Tabelle 3.3:** Eigenschaften der Fahrkurven im Vergleich

Fahrzyklus	Testdauer [s]	Testlänge [km]	$v_{\emptyset}$ [km/h]	$v_{\max}$ [km/h]
ECE-EUDC	1220	11,007	32,5	120
Straßentyp 1 (B 10)	850	19,083	80,8	99
Straßentyp 2 (B 14)	920	6,770	26,5	59
Straßentyp 3 (Neue Weinsteige)	952	7,740	29,3	49
Straßentyp 4 (Zone 30)	845	6,223	26,5	37

Die realen Fahrkurven für den Ballungsraum sind in einem anderen vom PEF geförderten Vorhaben entstanden [HITZLER & ESSERS (1997)].

Bei den Straßentypen Nr. 1, 2 und 3 ist der Messung jeweils ein Konditionierzyklus vorangestellt. Er soll bei allen Messungen dieser Straßentypen die gleiche Ausgangstemperatur von Motor und Katalysator gewährleisten. Bei Straßentyp 4 entfällt diese Konditionierung, der Testanfang entspricht dem des ECE-Zyklus mit 40 Sekunden Motorlauf nach Kaltstart. Der ECE-Zyklus wurde in das Versuchsprogramm aufgenommen, um die Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen zu ermöglichen.

## 4. Auswertung

Im Folgenden wird der Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung auf den Ausstoß von Schadstoffen zuerst beim Katalysator mit Keramikträger und anschließend beim Metallträgerkatalysator untersucht. Die Auswertung beginnt jeweils mit den Emissionen des Distickstoffoxid gefolgt von den Emissionen der gesetzlich limitierten Stickstoffoxide, Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxids. Abschließend wird der Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung auf die Emissionen des Benzol betrachtet.

### 4.1 Einfluss der Kraftstoffe auf die Emissionen des Katalysators mit Keramikträger

#### 4.1.1 Einfluss der Kraftstoffe auf den Ausstoß von Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O)

Die Auswertung der Messungen des Straßentyp 4 zeigt, dass beim Katalysator mit Keramikträger die beiden MTBE-haltigen Kraftstoffe weniger Distickstoffoxid produzieren als der Standardkraftstoff und der paraffinische Kraftstoff RK 2 (**Abbildung 4.1**). Beim Kraftstoff RK 2 ist der Ausstoß um 0,83% höher als derjenige des Standardkraftstoffs mit einem Wert von 8,86 mg/km. Die Emissionen der Kraftstoffe Phase 2 (5,9 mg/km) und Kraftstoff RK 1 (6,70 mg/km) liegen um ca. 30 bis 40% niedriger.

Da es sich bei den Werten für den Straßentyp 4 um Mittelwerte aus bis zu vier Versuchen handelt, ist in **Abbildung 4.1** die Standardabweichung mit angegeben. Sie zeigt eine gute Wiederholgenauigkeit für Emissionsmessungen auf einem Rollenprüfstand.

Ein ähnliches Bild zeigen die Emissionen für den Straßentyp 1 in **Abbildung 4.2**. Auch hier sind die Emissionswerte des Distickstoffoxid bei den Kraftstoffen Phase 2 und RK 1 deutlich geringer als beim Standardkraftstoff (4,52 mg/km). Mit Kraftstoff Phase 2 (2,89 mg/km) werden 36,1% weniger emittiert, bei Kraftstoff RK 1 mit 2,49 mg/km sind die N<sub>2</sub>O-Emissionen 44,9% niedriger. Für Kraftstoff RK2 ist der Ausstoß an N<sub>2</sub>O mit 3,66 mg/km noch ca. 19,0% geringer.

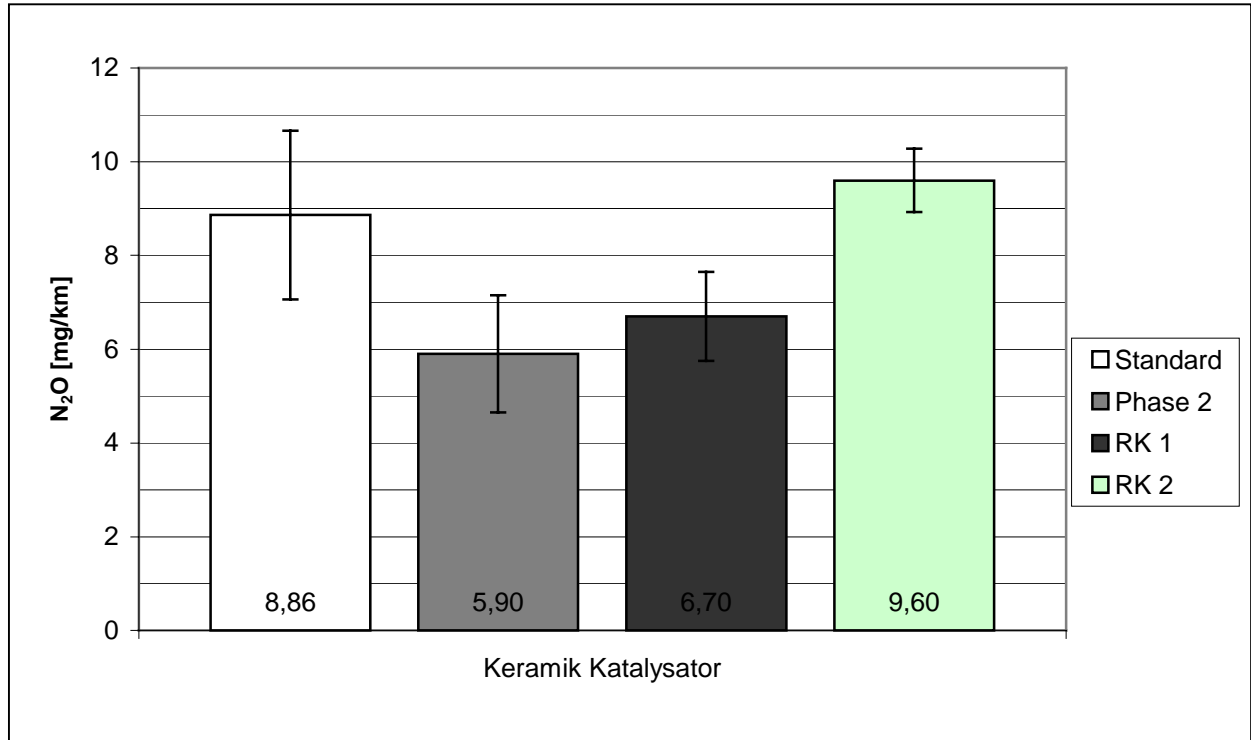


Abbildung 4.1: N<sub>2</sub>O-Emissionen des Katalysators mit Keramikträger für den Straßentyp 4

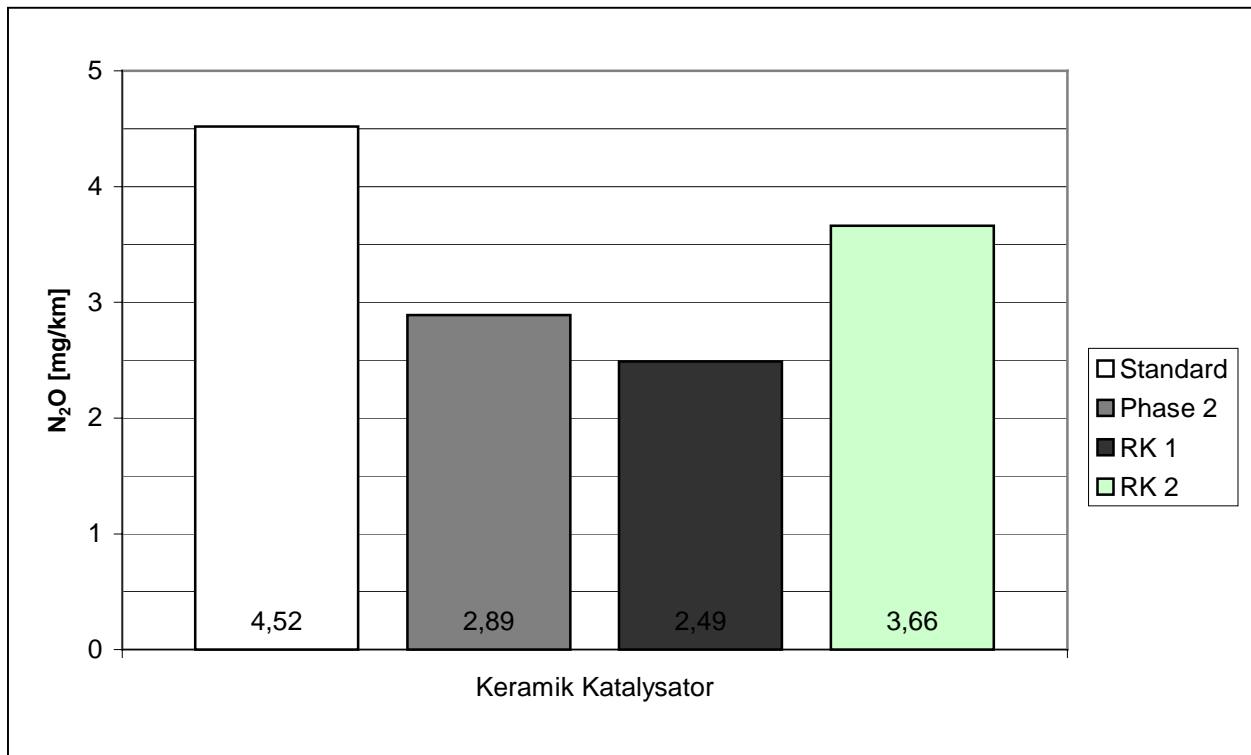
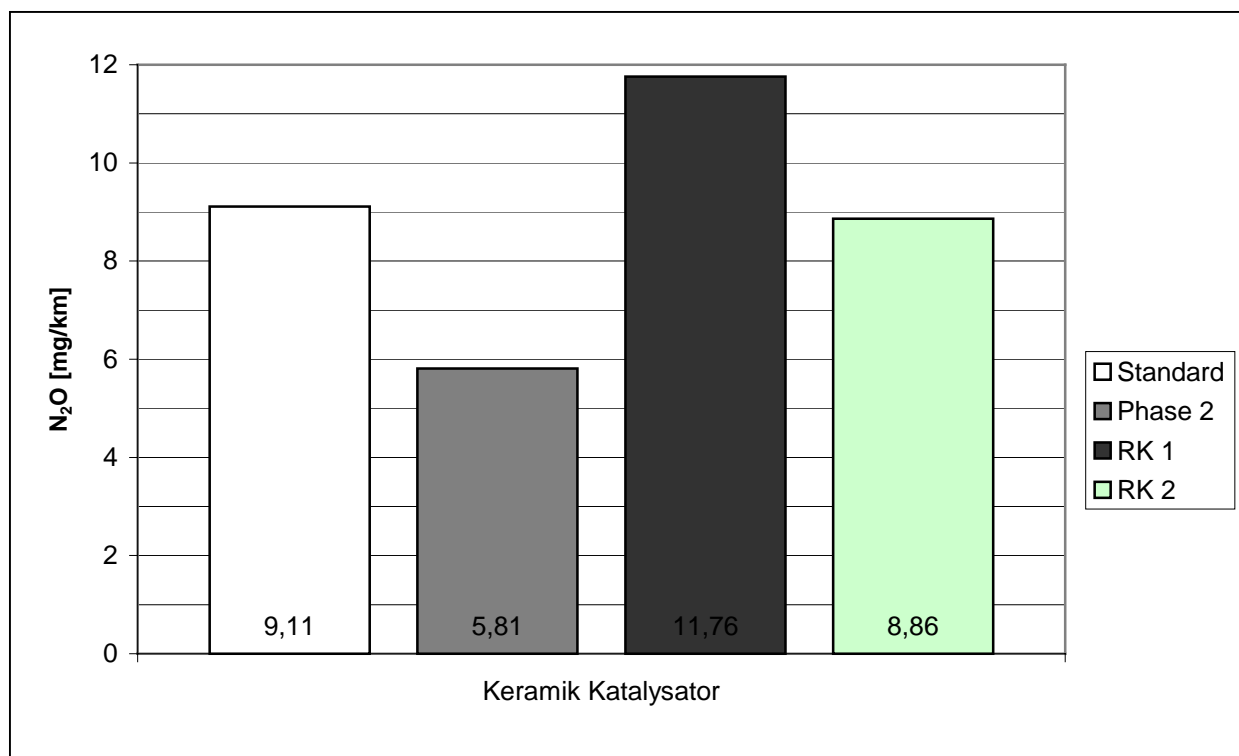


Abbildung 4.2: N<sub>2</sub>O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 1



**Abbildung 4.3:** N<sub>2</sub>O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2

**Abbildung 4.3** zeigt die N<sub>2</sub>O-Emissionen für den Straßentyp 2. Der geringste Ausstoß an N<sub>2</sub>O tritt beim Kraftstoff Phase 2 mit 5,81 mg/km auf. Das ergibt eine Verringerung von 36,2% bezogen auf den Standardkraftstoff. Mit 8,86 mg/km werden mit dem Kraftstoff RK 2 lediglich 2,7% weniger als beim Referenzkraftstoff emittiert. Als Sonderfall gegenüber den bisher gezeigten Ergebnissen stellt sich die Emission für den Kraftstoff RK 1 dar. Hier ist der Ausstoß von Distickstoffoxid mit 11,76 mg/km um 29,1% höher als derjenige des Standardkraftstoffs. Da sich die anderen drei Kraftstoffe in das bisher gezeigte Emissionsverhalten der Straßentypen 1 und 4 sehr gut einfügen, könnte hier zuerst ein Messfehler oder auch ein Fehler in der Versuchsdurchführung vermutet werden. Die zusätzlich Online aufgezeichneten Emissionsverläufe (**Abbildung 4.4**) bestätigen jedoch die Werte der Beutelauswertung. Die Emission des Kraftstoff RK 1 ist fast durchgängig die höchste der betrachteten Kraftstoffe. Auch der Vergleich der Temperaturverläufe für die Kraftstoffe beim Straßentyp 2 erklärt nicht den hohen Wert für RK 1 bei diesem Straßentyp.

Das Ergebnis für den Straßentyp 3 fügt sich wieder in das bekannte Muster ein (**Abbildung 4.5**). Den geringsten N<sub>2</sub>O-Ausstoß weist hier der Kraftstoff Phase 2 mit 4,87 mg/km auf. Das entspricht, gegenüber dem Standardkraftstoff, einer Verringerung von 47,7%. Auch für die beiden anderen reformulierten Kraftstoffe ergeben sich geringere Emissionen. Die Kraftstoffe RK 1 mit 7,2 mg/km und RK 2 mit 7,94 mg/km erzielen hier um 22,7% (RK 1) bzw. 14,7% (RK 2) bessere Emissionswerte als der Standardkraftstoff.

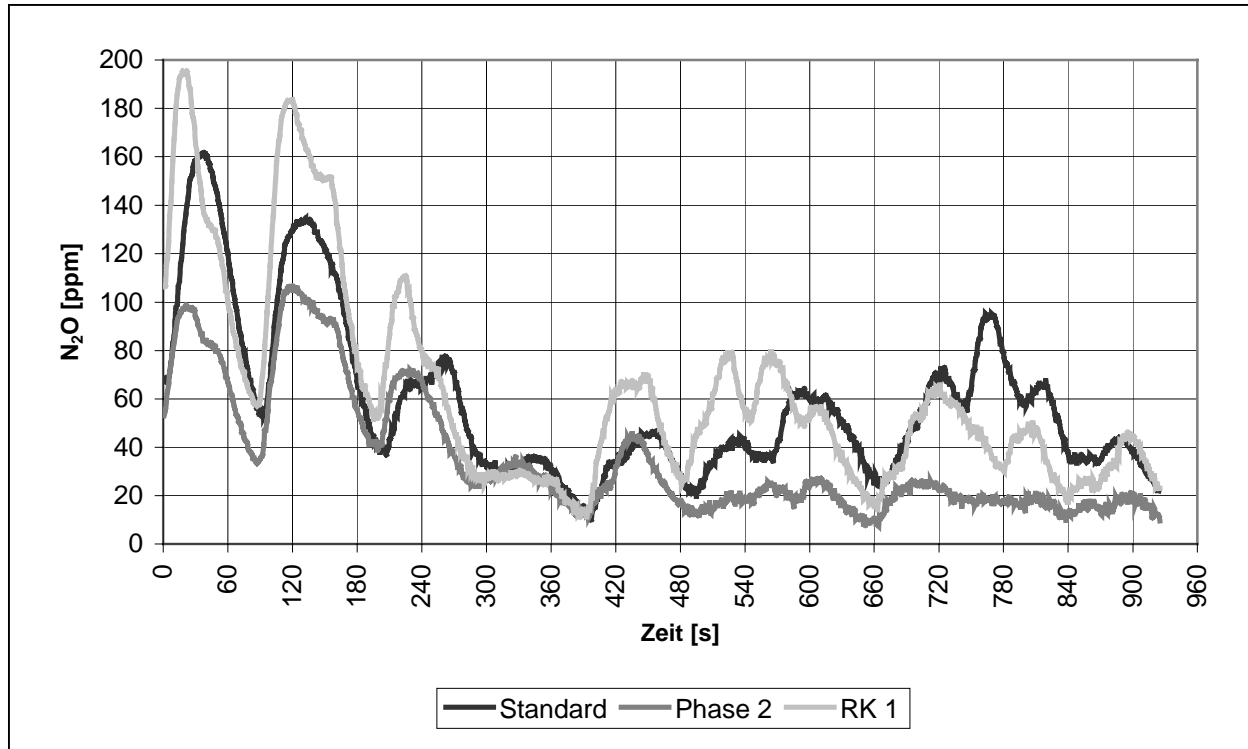


Abbildung 4.4: N<sub>2</sub>O-Emissionsverlauf des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2.

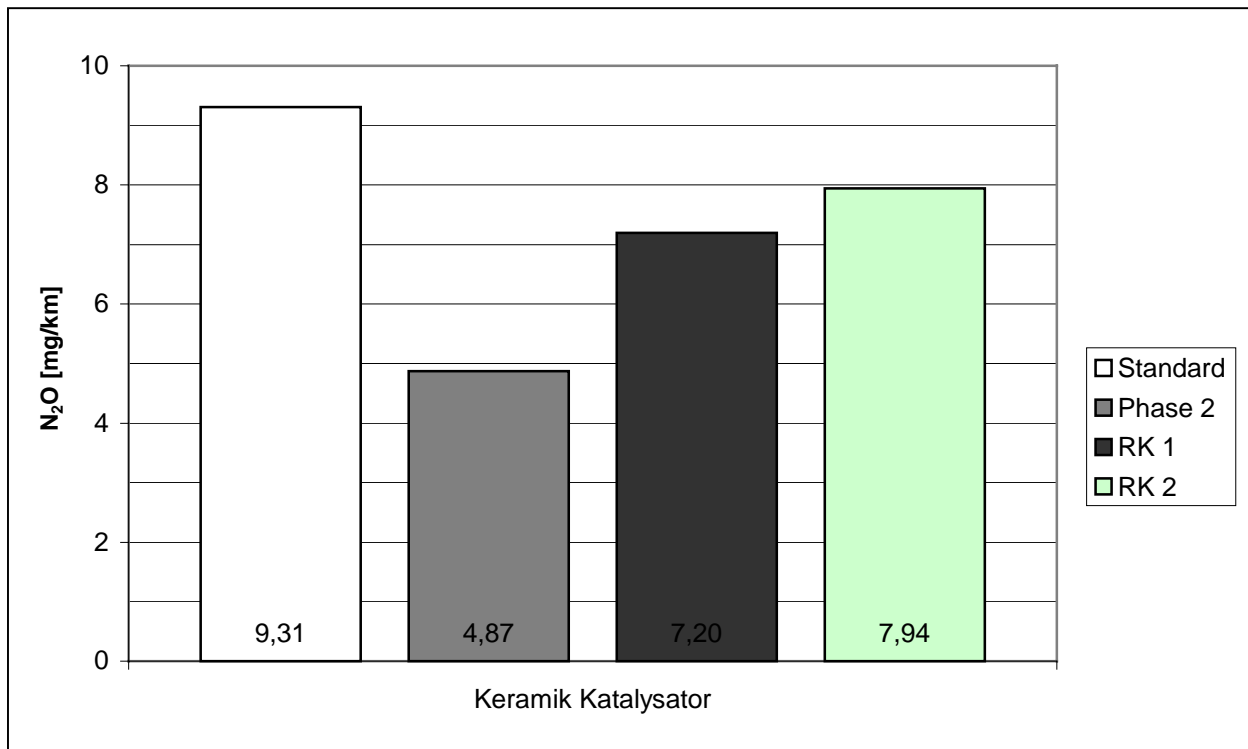
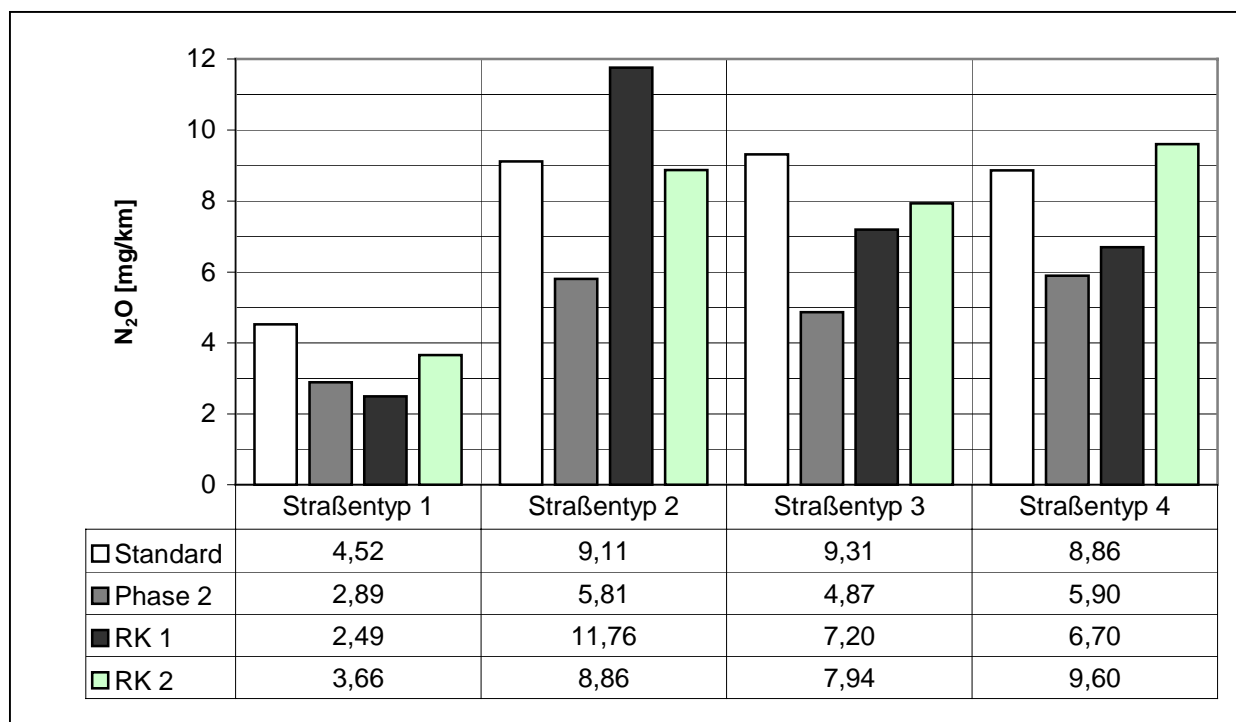


Abbildung 4.5: N<sub>2</sub>O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 3

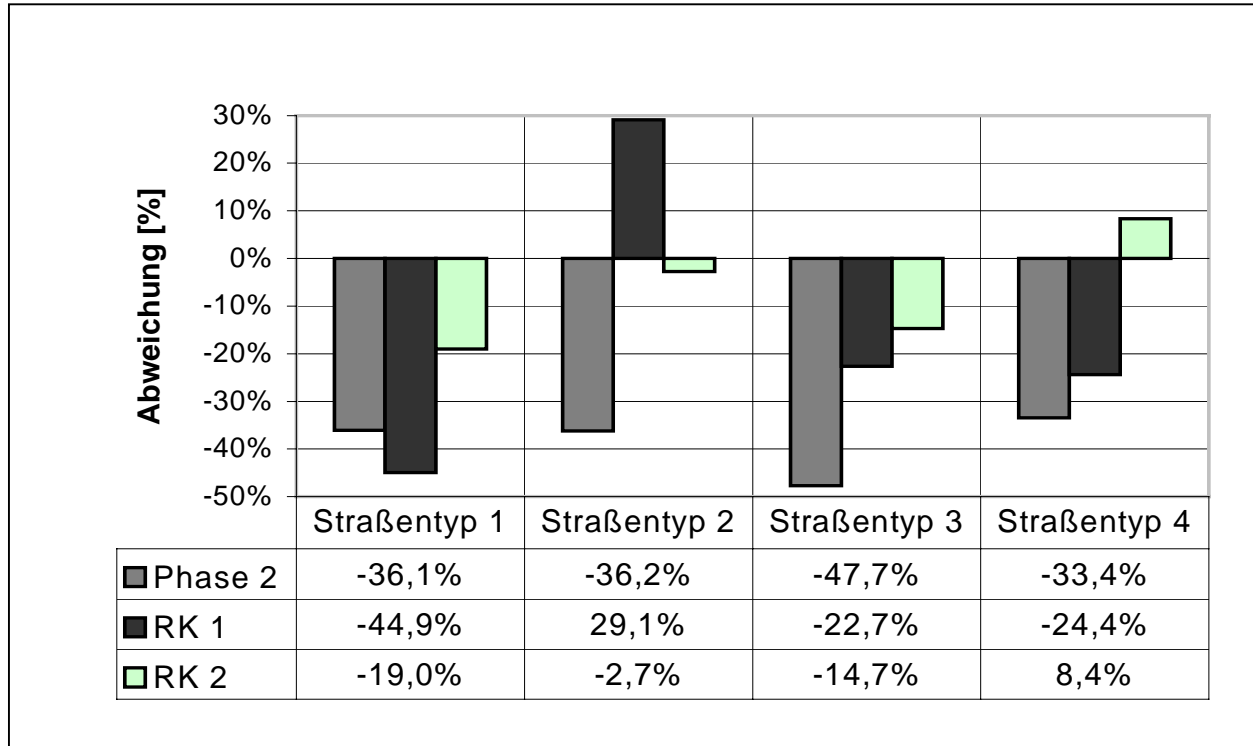


**Abbildung 4.6:** N<sub>2</sub>O-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger nach Straßentypen

Die Übersicht in **Abbildung 4.6** zeigt noch einmal deutlich die vom Straßentyp abhängigen Unterschiede der N<sub>2</sub>O-Emission und den Emissionsvorteil durch die Verwendung des Kraftstoffs Phase 2.

Das geringere Niveau der Emissionen für den Straßentyp 1 kann mit dem niedrigen Dynamikanteil des Fahrprofils und der relativ hohen Geschwindigkeit mit der daraus resultierenden hohen Abgastemperaturen erklärt werden. Auch das Verhältnis der Emissionen der Kraftstoffe Standard, Phase 2 und RK 2 zueinander ist über alle vier Straßentypen gesehen sehr gleichmäßig.

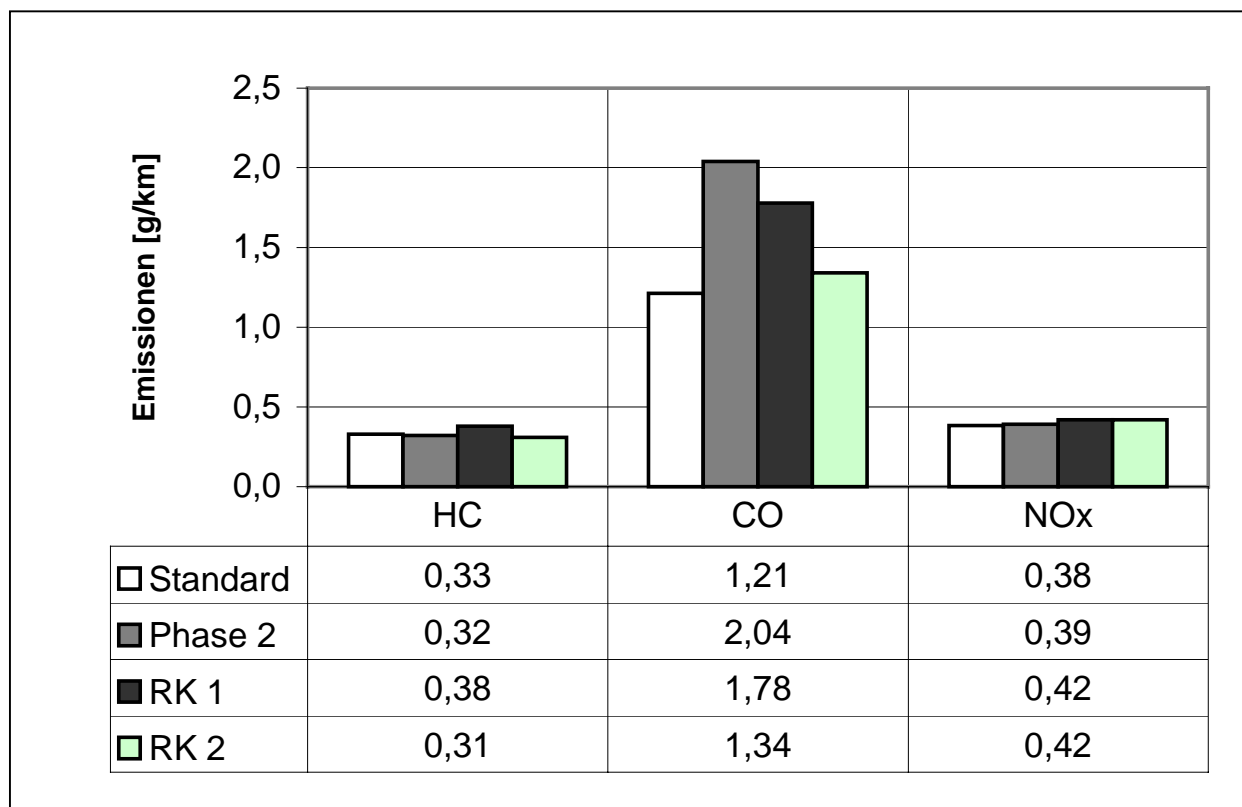
In **Abbildung 4.7** sind die prozentualen Veränderungen der N<sub>2</sub>O-Emissionen für die reformulierten Kraftstoffe in Bezug auf den Standardkraftstoff für die jeweiligen Straßentypen dargestellt.



**Abbildung 4.7:** Rückgang der N<sub>2</sub>O-Emissionen beim Katalysator mit Keramikträger für die reformulierten Kraftstoffe bezogen auf den Standardkraftstoff

#### 4.1.2 Einfluss der Kraftstoffe auf den Ausstoß der gesetzlich limitierten Schadstoffe

**Abbildung 4.8** zeigt den Ausstoß dieser Schadstoffe für den Straßentyp 4. Die Kohlenwasserstoffemissionen der vier Kraftstoffe sind auf nahezu gleichem Niveau. Der Kraftstoff Phase 2 emittiert jedoch 3% weniger, Kraftstoff RK 2 noch ca. 6% weniger als der Standardkraftstoff. Lediglich beim Kraftstoff RK 1 liegt der Ausstoß verglichen mit dem Standardkraftstoff um ca. 15% höher.



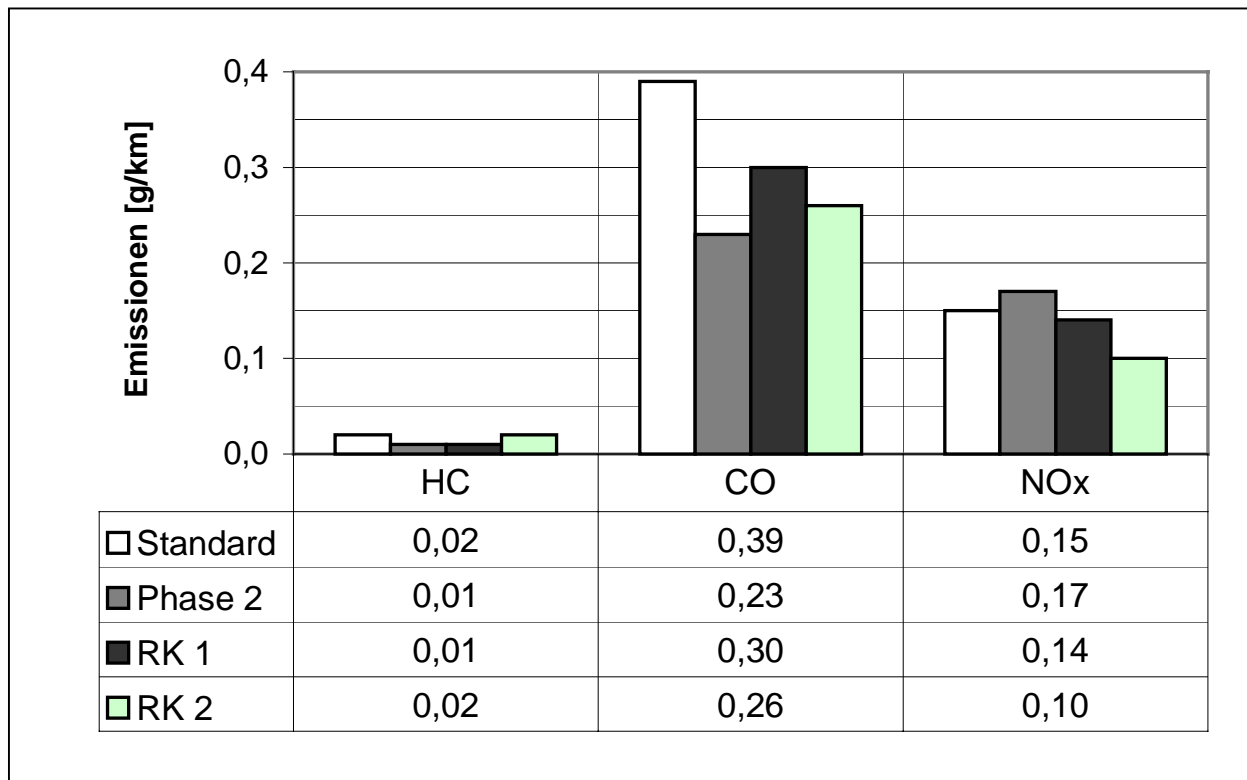
**Abbildung 4.8:** Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 4

Die Werte bei den Stickstoffoxiden liegen auf gleichem Niveau. Gegenüber dem Referenzkraftstoff liegt der Wert für den Kraftstoff Phase 2 um 2,6% höher. Die Werte für die Kraftstoffe RK 1 und RK 2 sind um 5,3% (RK 2) höher.

Den größten Einfluss haben die reformulierten Kraftstoffe auf die Emissionswerte des Kohlenmonoxid. Der Wert für den Kraftstoff RK 2 liegt um 10,7% über dem des Standardkraftstoffs. Die Emissionswerte für die Kraftstoffe Phase 2 (+68,6%) und RK 1 (+47,1%) sind deutlich höher als der des Referenzkraftstoffs.



**Abbildung 4.9** zeigt die Werte der limitierten Schadstoffe für den Straßentyp 1. Bei diesem Straßentyp liegen die Werte der Kohlenwasserstoffe bei 0,02 g/km für die Kraftstoffe Standard und RK 2 sowie bei 0,01 g/km für die Kraftstoffe Phase 2 und RK 1. Hier sind die Emissionen aller reformulierten Kraftstoffe kleiner oder gleich dem Ausstoß des Referenzkraftstoffs.



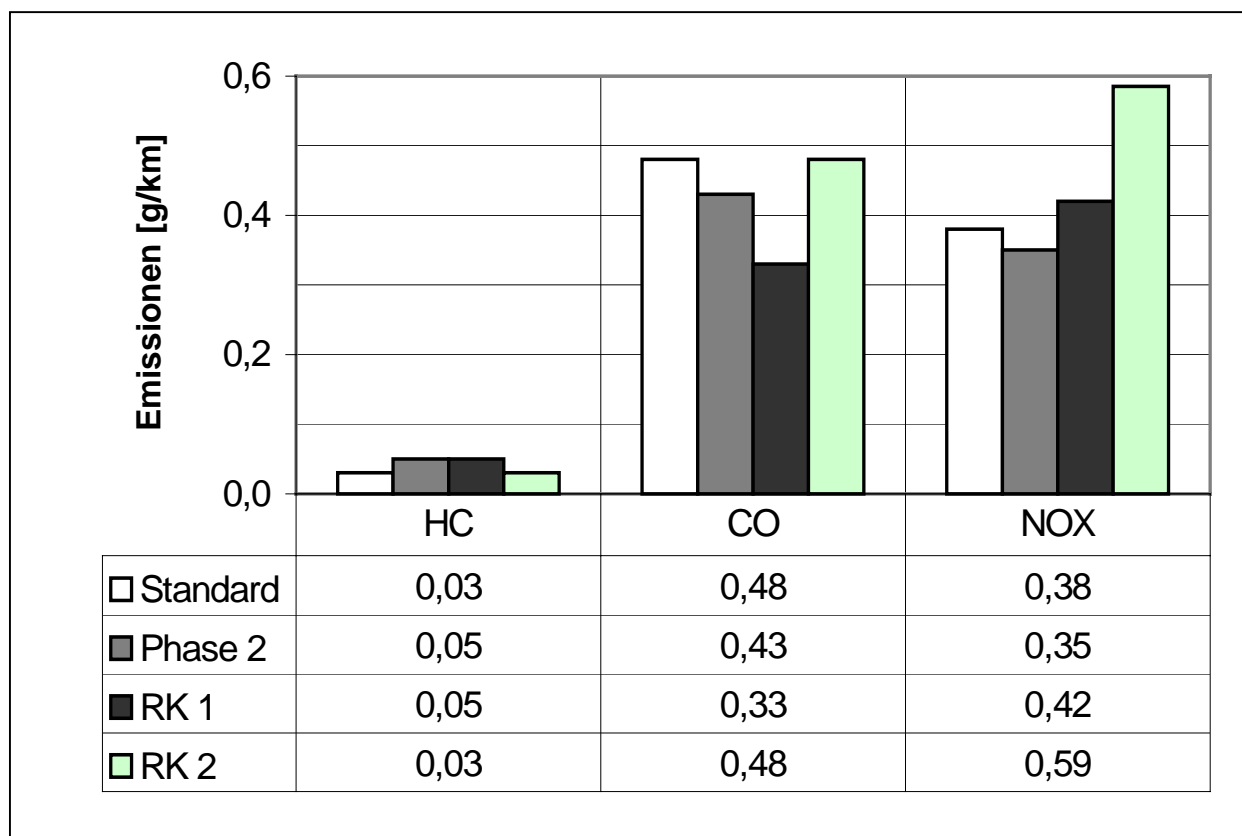
**Abbildung 4.9:** Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 1

Auch die Werte für das Kohlenmonoxid liegen bei allen reformulierten Kraftstoffen um 41,0% bis 23,1% unter dem des Standardkraftstoff wobei der Kraftstoff Phase 2 den geringsten Ausstoß aufweist.

Die Werte für die Stickstoffoxide sind uneinheitlich. So emittiert der Kraftstoff Phase 2 mit einem um 13,3% höheren Wert etwas mehr NO<sub>x</sub> als der Referenzkraftstoff. Die beiden anderen reformulierten Kraftstoffe lassen die Emissionen hingegen um 6,7% (RK 1) und 33,3% (RK 2) sinken.

Für diesen Straßentyp ergeben sich für die reformulierten Kraftstoffe untereinander recht uneinheitliche Werte bei den gesetzlich limitierten Schadstoffen. Jedoch scheint der Kraftstoff RK 2 insgesamt gesehen etwas günstiger zu sein als die beiden anderen reformulierten Kraftstoffe, da er einerseits von keinem der Schadstoffe mehr emittiert als der Standardkraftstoff

und andererseits gegenüber dem Kraftstoff RK 1 'deutliche' Vorteile bei zwei Schadstoffen aufweist. Zu beachten ist allerdings auch, dass sich die Emissionen bei allen drei Schadstoffen, bezogen auf die anderen realen Streckentypen, auf einem sehr geringen Niveau befinden. **Abbildung 4.10** zeigt die Werte der limitierten Schadstoffe für den Straßentyp 2.



**Abbildung 4.10:** Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2

Bei den Kohlenwasserstoffen weisen hier die Kraftstoffe Standard und RK 2 mit einem Ausstoß von 0,03 g/km die besten Werte auf. Um 40% höher liegen die Werte für die Kraftstoffe Phase 2 und RK 1.

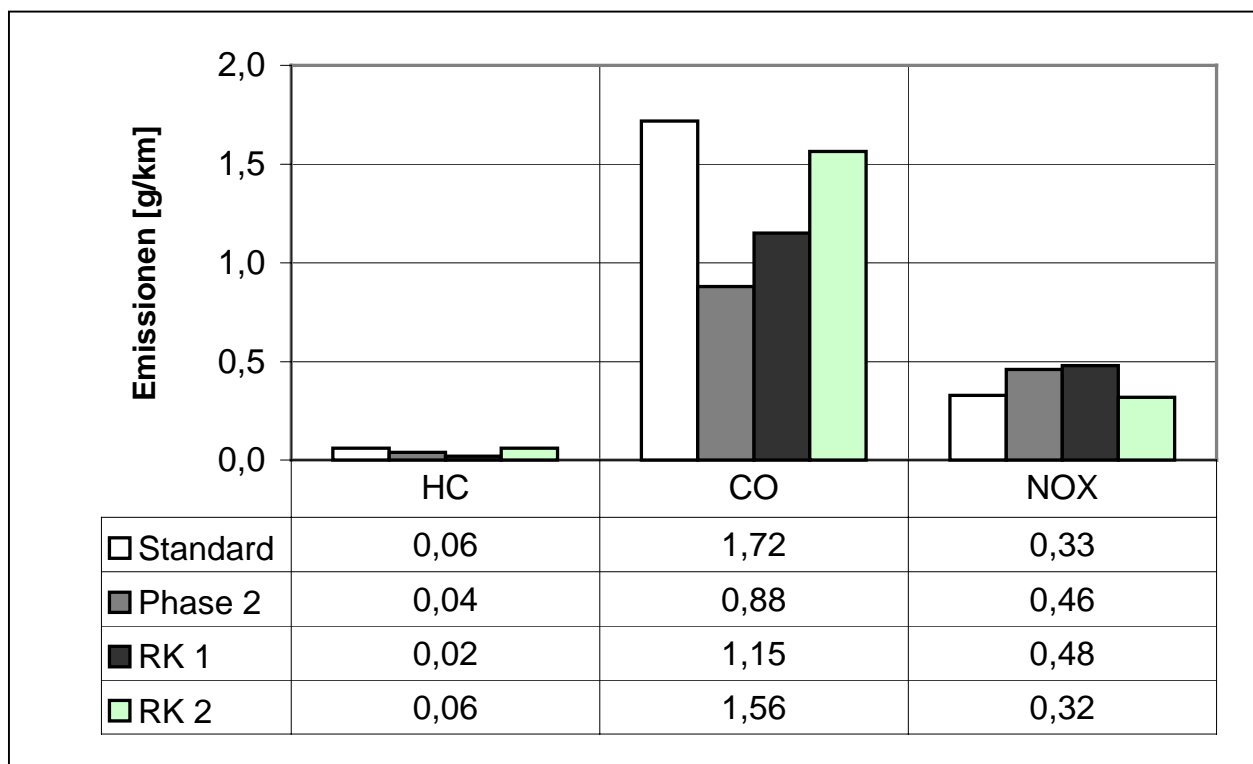
Auch beim Kohlenmonoxid ergeben sich für die Kraftstoffe Standard und RK 2 mit 0,48 g/km die gleichen Emissionen, jetzt allerdings als höchste Werte. Mit den Kraftstoffen Phase 2 (-10,4%) und RK 1 (-31,3%) emittierte das Fahrzeug weniger Kohlenmonoxid.

Bei den Stickstoffoxiden erreicht der Kraftstoff Phase 2 den besten Wert mit einem um 7,9% verringerten Ausstoß gegenüber dem Standardkraftstoff (0,38 g/km). Die Werte für die Kraftstoffe RK 1 und RK 2 sind um 13,2% (RK 1) bzw. 55,3% (RK 2) höher als beim Referenzkraftstoff.

## Auswertung

Bei diesem Straßentyp erzielt, über alle drei Schadstoffe gesehen, der Kraftstoff Phase 2 die besten Werte. Allerdings scheint er insgesamt gesehen nur geringfügig 'günstiger' zu sein als die anderen drei Kraftstoffe.

**Abbildung 4.11** zeigt den Ausstoß der limitierten Schadstoffe für den Straßentyp 3. Auch hier sind die Werte für den Ausstoß der Kohlenwasserstoffe bei den Kraftstoffen Standard und RK 2 mit 0,06 g/km gleich hoch. Im Vergleich dazu liegen die Werte für die Kraftstoffe Phase 2 (-33,3%) und RK 1 (-66,7%) deutlich niedriger.

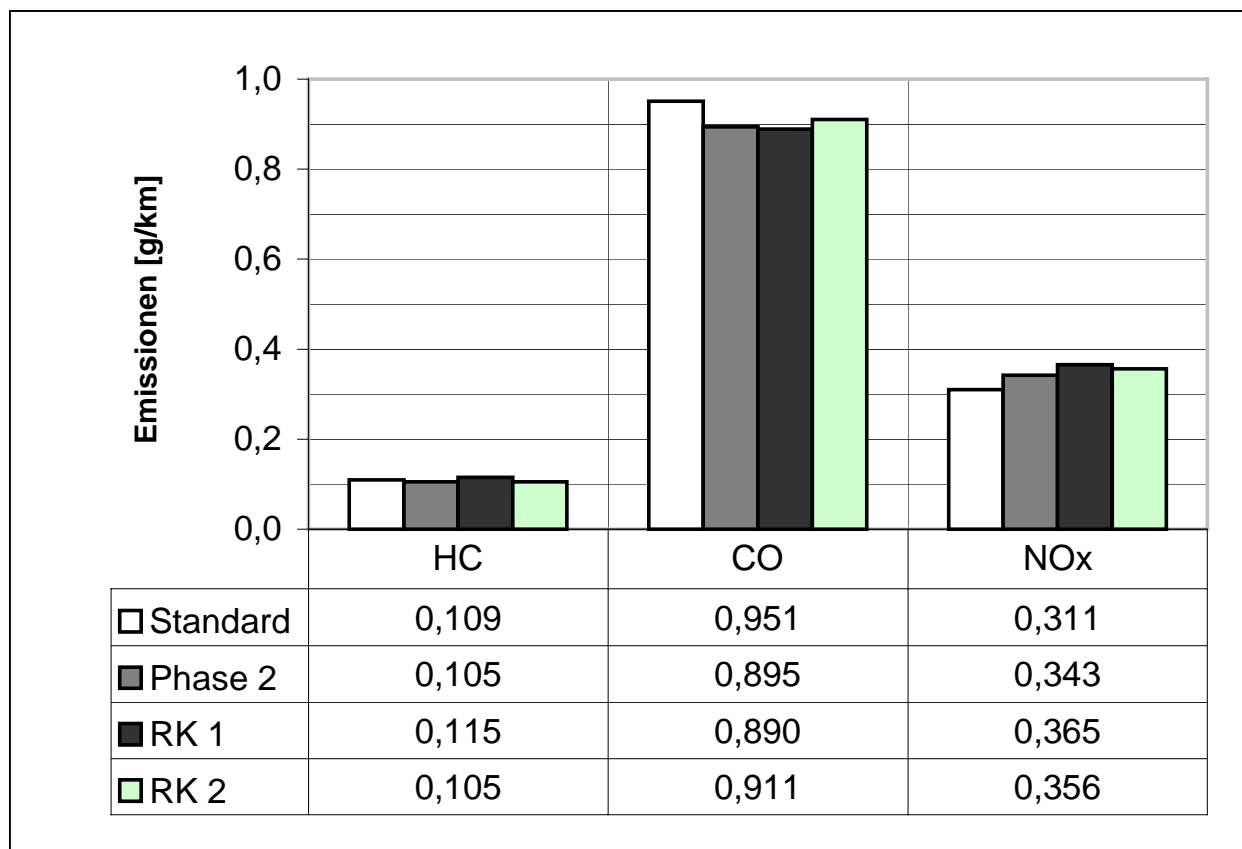


**Abbildung 4.11:** Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 3

Für den Ausstoß von Kohlenmonoxid ergeben sich für alle reformulierten Kraftstoffe geringere Emissionen gegenüber dem Standardkraftstoff. Der RK 2 liefert hierbei die geringste Verbesserung (-9,3%). Die Kraftstoffe Phase 2 und RK 1 bieten mit 48,8% (Phase 2) bzw. 33,1% (RK 1) Verbesserung deutlich verringerte Werte.

Auch beim Ausstoß der Stickstoffoxide liegen die Werte des Standardkraftstoff mit 0,33 g/km und dem Kraftstoff RK 2 auf praktisch gleichem Niveau, wobei der Kraftstoff RK 2 noch 0,01 g/km oder 3,0% weniger emittiert. Höher liegen die Werte für die Kraftstoffe Phase 2 und RK 1. Verglichen mit dem Standardkraftstoff stoßen sie um 39,4% (Phase 2) bzw. 45,5% (RK 1) deutlich mehr Stickstoffoxide aus.

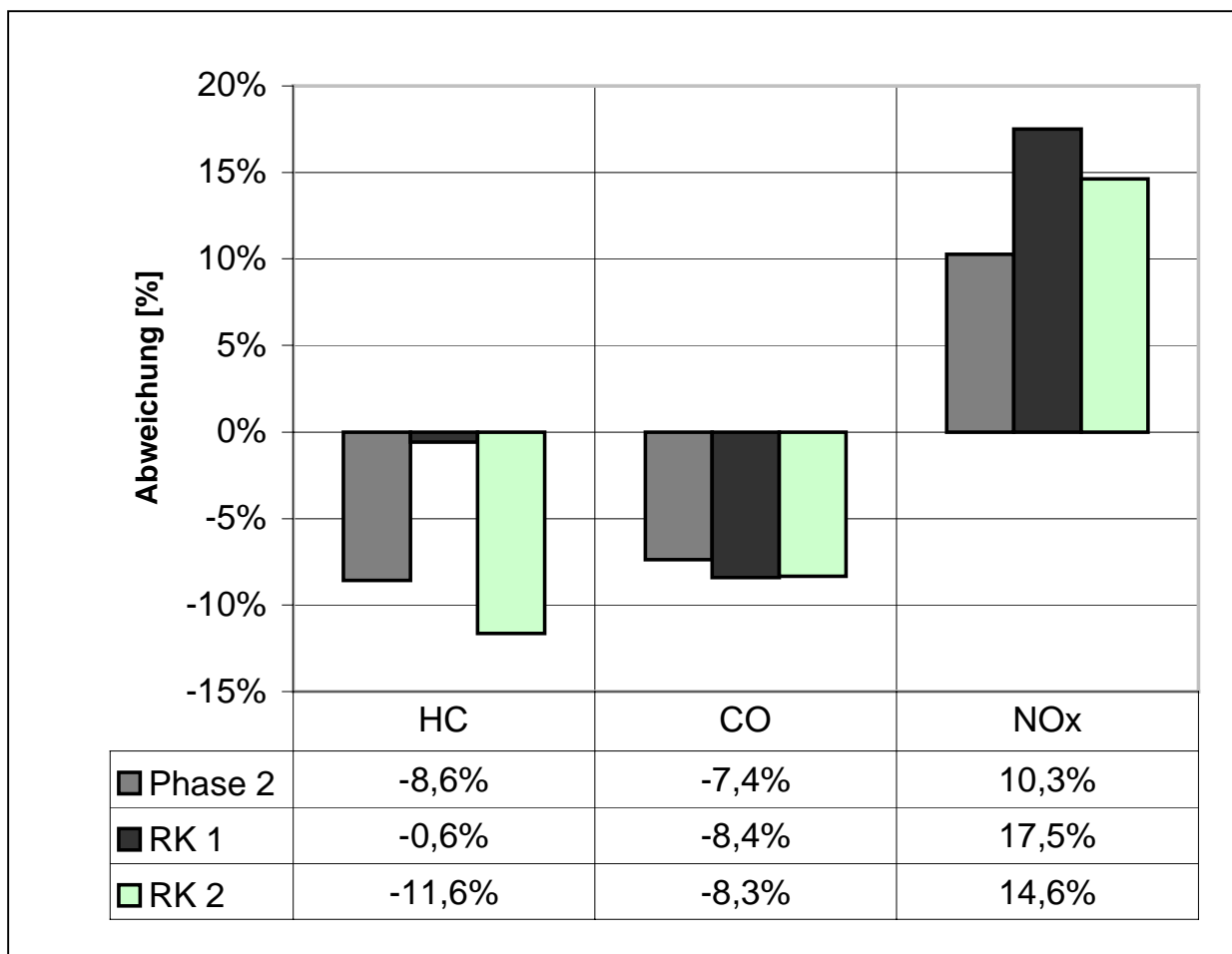
Somit ergibt sich auch für diesen Straßentyp ein eher uneinheitliches Ergebnis. Jedoch scheint auch hier der Kraftstoff Phase 2 insgesamt noch das beste Resultat für die limitierten Schadstoffe zu erbringen. **Abbildung 4.12** zeigt die Emissionen der limitierten Schadstoffe zusammengefaßt als Mittelwerte aus den Straßentypen.



**Abbildung 4.12:** Mittelwerte der Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysators mit Keramikträger über alle Straßentypen

Über alle vier Straßentypen gesehen erweisen sich die Kraftstoffe Phase 2 und RK 2 bei der Verringerung der gesetzlich limitierten Schadstoffe am Effektivsten. Sowohl von den Kohlenwasserstoffen als auch vom Kohlenmonoxid emittieren die beiden Kraftstoffe insgesamt weniger Schadstoffe als der Standardkraftstoff. Auffällig ist, dass alle drei reformulierten Kraftstoffe mehr Stickstoffoxide produzieren als der Standardkraftstoff. **Abbildung 4.13** zeigt dies noch deutlicher. Hier sind die Veränderungen der Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe für die reformulierten Kraftstoffe bezogen auf den Standardkraftstoff dargestellt. Betrachtet werden die Veränderungen der Mittelwerte über die Straßentypen aus **Abbildung 4.12**.

Deutlich zu erkennen ist hier die Verringerung der Emissionen bei den Kohlenwasserstoffen und dem Kohlenmonoxid, welche für alle reformulierten Kraftstoffe zu verzeichnen ist.



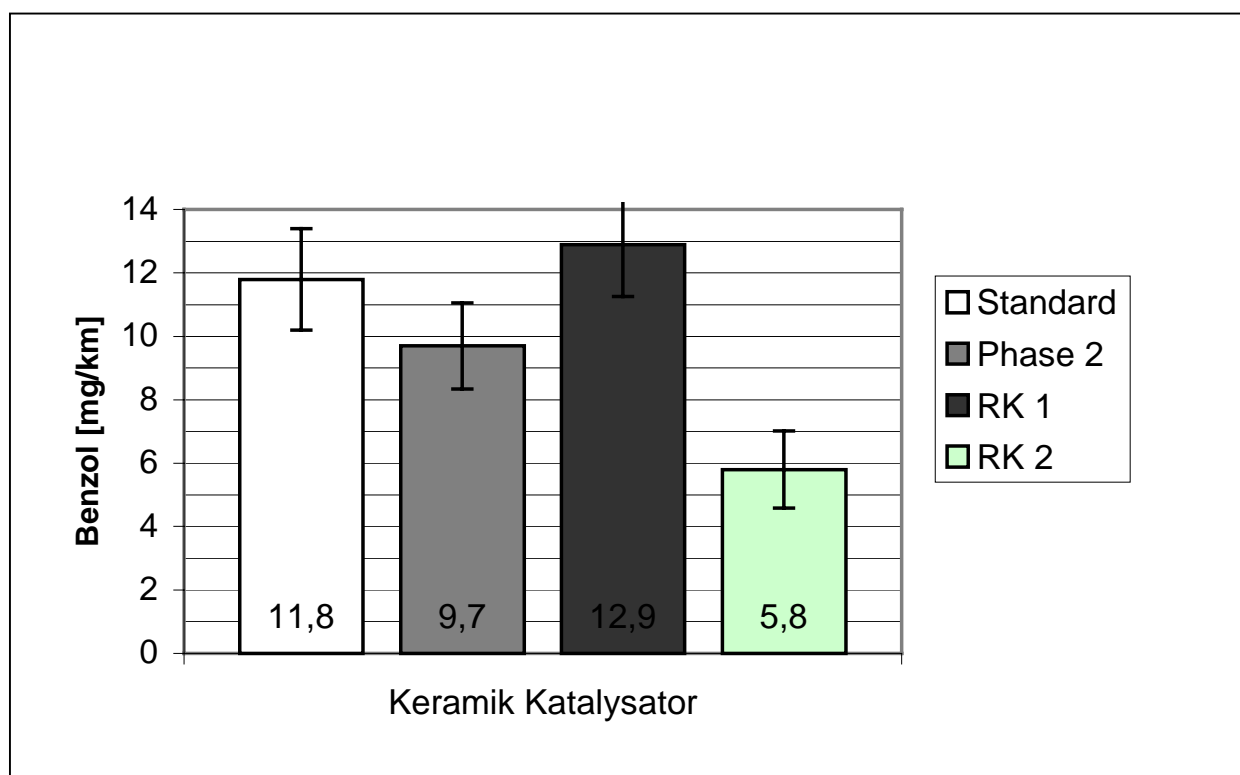
**Abbildung 4.13:** Rückgang der Emissionen der gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Keramikträger für die reformulierten Kraftstoffe bezogen auf den Standardkraftstoff (aus Mittelwerten)

#### 4.1.3 Einfluss der Kraftstoffe auf die Benzolemissionen (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)

In den folgenden Diagrammen werden die Auswirkungen der Kraftstoffzusammensetzung auf den Ausstoß von Benzol für den Katalysator mit Keramikträger dargestellt.

Nach bisherigen Forschungsergebnissen ist hier zu erwarten, dass die Benzolemission bei dem Kraftstoff am Geringsten ist, der auch den geringsten Gehalt an Benzol und gleichzeitig den

kleinsten Wert für die restlichen aromatischen Kohlenwasserstoffe<sup>9</sup> aufweist (Vgl.: Kap. 2.2.3.).  
**Abbildung 4.14** zeigt die Benzol-Emissionen für den Straßentyp 4



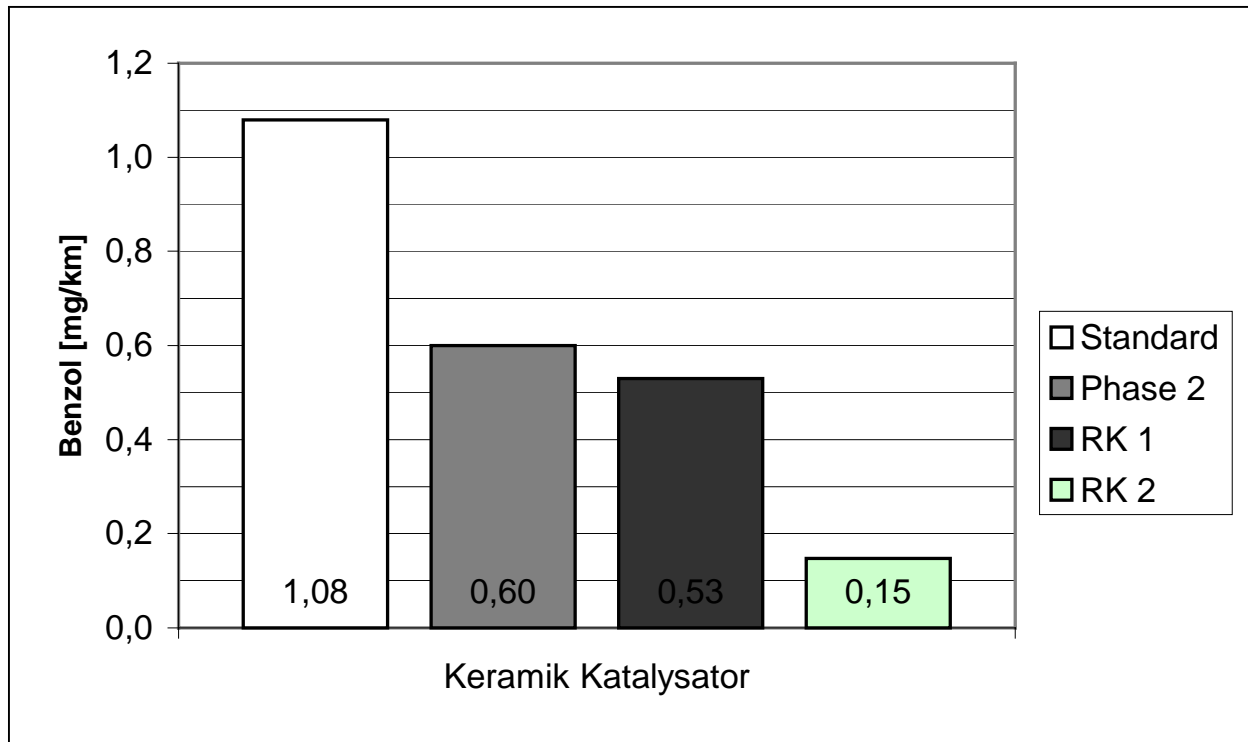
**Abbildung 4.14:** Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 4

Deutlich zu sehen ist hier, dass die Kraftstoffe mit hohem Aromatengehalt (Standard und RK 1) ähnlich hohe Benzol-Emissionen aufweisen. Der Kraftstoff RK 1 emittiert hierbei noch 9,3% mehr Benzol als der Standardkraftstoff.

Der Kraftstoff Phase 2 stößt mit 9,7 mg/km deutlich weniger (-17,8%) Benzol aus als der Standardkraftstoff. Noch bessere Werte erzielt der Kraftstoff RK 2. Er emittiert lediglich 5,8 mg/km was einer Verringerung von 50,8% entspricht. Da auch die Kraftstoffe Phase 2 und RK 2 einen vergleichbar hohen Aromatengehalt im Kraftstoff aufweisen (Vgl.: **Tabelle 3.2**) ist der verringerte Ausstoß gegenüber dem Kraftstoff Standard schlüssig. Der weit geringere Wert des Benzol-Ausstoßes des Kraftstoffs RK 2 gegenüber dem Kraftstoff Phase 2 kann durch den sehr viel geringen Benzolgehalt im Kraftstoff RK 2 (0,06 Vol.-%) gegenüber demjenigen im Kraftstoff Phase 2 (0,92 Vol.-%) erklärt werden.

<sup>9</sup> Aromaten und Benzol werden hier getrennt betrachtet obgleich das Benzol zu den Aromaten gehört. Ebenso erfolgt die Betrachtung von Benzol-Emissionen unabhängig von denen der restlichen Kohlenwasserstoffe.

Den geringsten Benzol-Ausstoß bei diesem Straßentyp produziert somit der Kraftstoff RK 2 wobei auch der Kraftstoff Phase 2 eine gute Verringerung zum Standardkraftstoff bietet. **Abbildung 4.15** zeigt die Benzol-Emissionen für den Straßentyp 1.

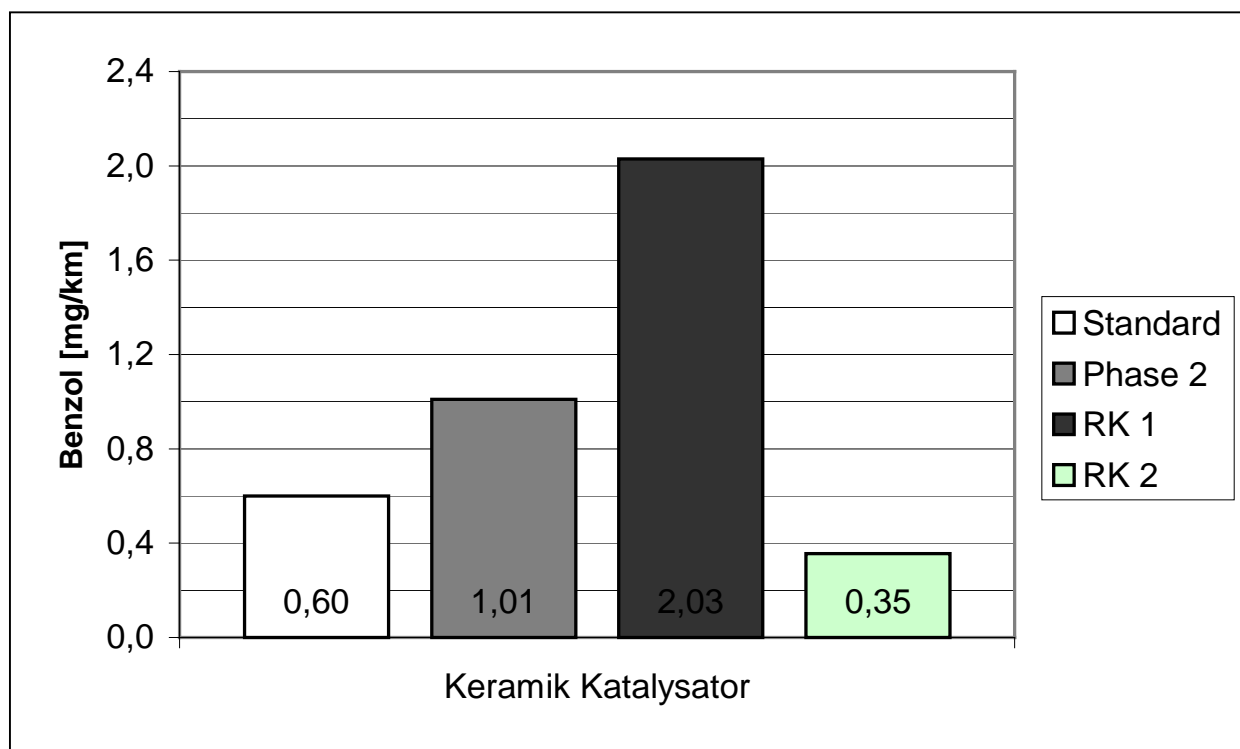


**Abbildung 4.15:** Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 1

Bei diesem Straßentyp weisen alle reformulierten Kraftstoffe deutlich geringere Benzol-Emissionen auf als der Standardkraftstoff, der einen Wert von 1,08 mg/km erreicht. Beim Kraftstoff Phase 2 ist die Verringerung mit 44,4% am Geringsten. Der Ausstoß für den Kraftstoff RK 1 ist mit einer Reduktion von 50,9% nur unwesentlich besser als der des Kraftstoff Phase 2. Den geringsten Wert erreicht der Kraftstoff RK 2 mit 0,15 mg/km. Das entspricht, gemessen am Kraftstoff Standard, einer Verringerung um 86,1%.

Der Kraftstoff RK 2 erzielt somit auch bei diesem Straßentyp das beste Ergebnis. Die Benzol-Emissionen der Kraftstoffe verringern sich mit der Abnahme der Gehalte an Benzol in den Kraftstoffen. Die sehr ähnlichen Werte für die Kraftstoffe Phase 2 und RK 1 ergeben sich aus deren Gehalten an Benzol (Phase 2) und Aromaten (RK 1). Während der Kraftstoff Phase 2 mit geringem Aromatengehalt die Benzol-Emissionen aus dem Benzolgehalt produziert, geschieht dies beim Kraftstoff RK 1 durch den hohen Anteil an anderen Aromaten da er kaum Benzol enthält (0,05 Vol.-%). Praktisch den gleichen Benzolgehalt weist der Kraftstoff RK 2 auf. Da dieser jedoch zusätzlich relativ geringe Mengen an Aromaten enthält, fällt der Ausstoß von

Benzol gegenüber dem Kraftstoff RK 1 noch einmal geringer aus. Die Benzol-Emissionen für den Straßentyp 2 sind in **Abbildung 4.16** dargestellt.

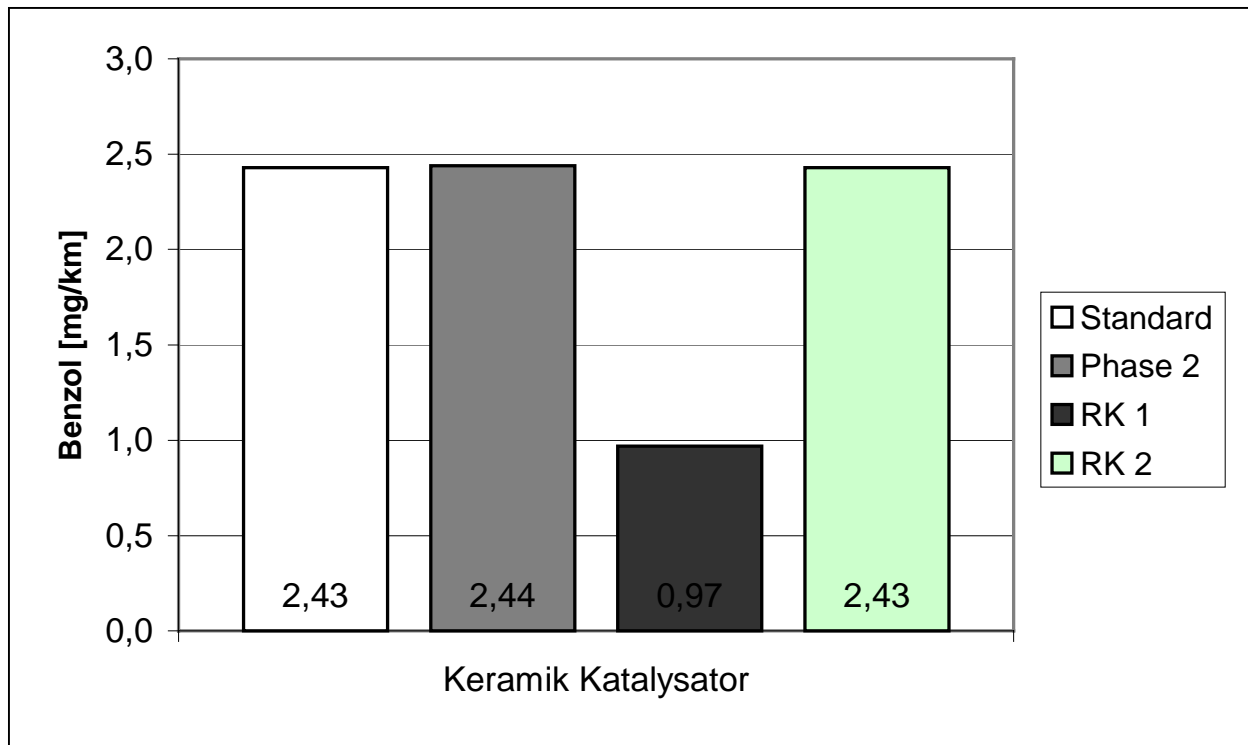


**Abbildung 4.16:** Benzol-Emissionen des Katalysator mit Keramikträger für den Straßentyp 2.

Für diesen Straßentyp sieht das Ergebnis völlig anders aus. In Bezug auf die Benzol-Emission des Standardkraftstoff (0,6 mg/km) sind diejenigen der Kraftstoffe Phase 2 und RK 1 um 68,3% (Phase 2) bzw. 238,3% (RK 1) höher. Lediglich der Wert für den Kraftstoff RK 2 verhält sich wie erwartet und liegt mit 0,35 mg/km um 41,7% unter dem Wert des Kraftstoffs Standard. Somit erreicht dieser Kraftstoff bei den Benzol-Emissionen auch beim Straßentyp 2 das beste Ergebnis.

Die Werte für das Benzol in den Abgasen der Kraftstoffe Phase 2 und RK 1 allerdings weichen stark von den bisherigen Ergebnissen ab. Dieses Verhalten kann jedoch möglicherweise erklärt werden. So werden Benzol-Emissionen durch ungleichmäßigen Verkehrsfluss mit Ampelstopp negativ beeinflusst /8/. Hier wirkt sich dieser Effekt offensichtlich mit dem hohen Aromatengehalt beim Kraftstoff RK 1 bzw. dem relativ hohen Benzolgehalt beim Kraftstoff Phase 2 besonders negativ aus (**Abbildung 4.17**).



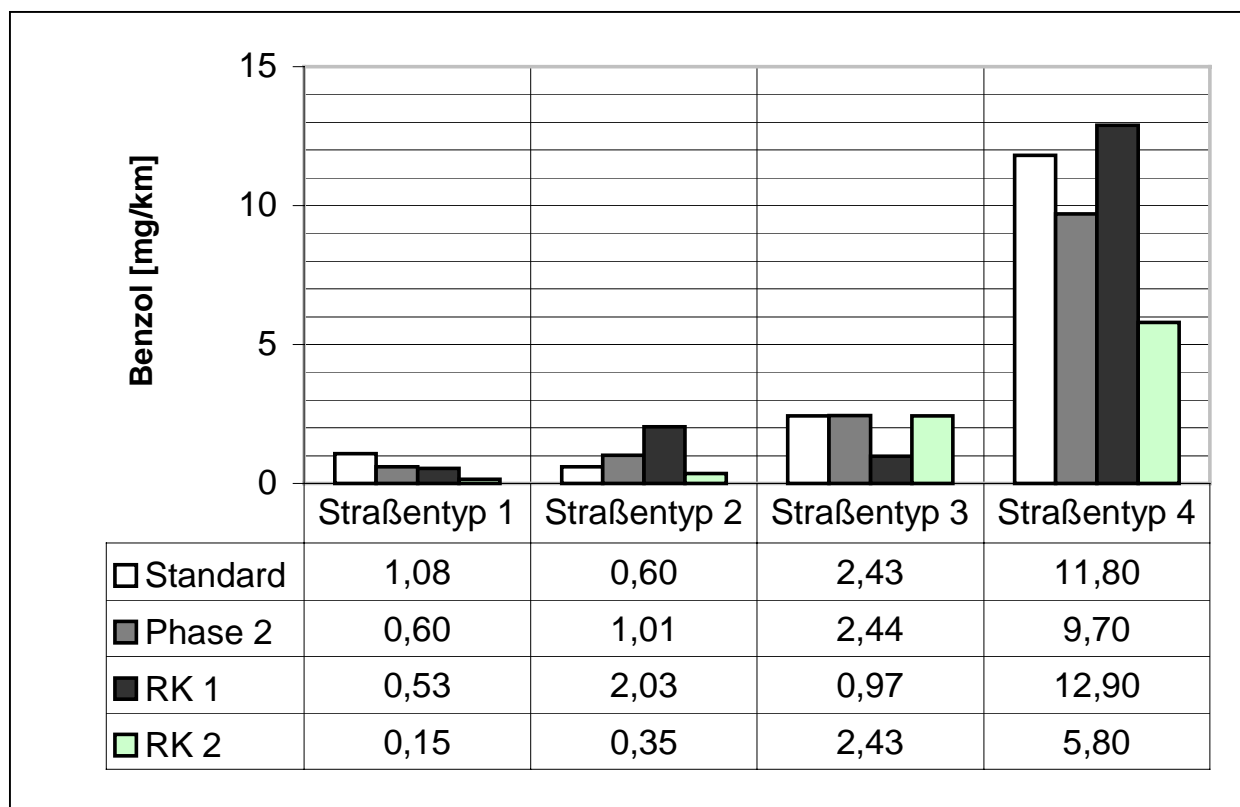


**Abbildung 4.17:** Ausstoß von Benzol am Keramik Katalysator für den Straßentyp 3

Auf den ersten Blick fallen hier die praktisch identischen Werte für die Kraftstoffe Standard, Phase 2 und RK 2 auf. Lediglich der Ausstoß für den Kraftstoff RK 1 liegt mit 0,97 mg/km um 60,1% deutlich niedriger.

Dieses Ergebnis kann mit den bisherigen Erkenntnissen bzgl. der Kraftstoffzusammensetzung nicht erklärt werden. Ebenso wenig ist es durch verschiedene Lastanforderungen begründbar, da es sich um den gleichen Streckentyp handelt. Auch Fehler in der Versuchsdurchführung können ausgeschlossen werden, da die Ergebnisse der anderen hier betrachteten Schadstoffe für diesen Straßentyp durchaus erklärbar sind. Somit bleibt auch hier nur der Verweis auf eine möglicherweise ungünstige Kombination von Kraftstoffen und Streckenprofil.

**Abbildung 4.18** zeigt die Benzol-Emissionen für alle Straßentypen. Zu erkennen ist das unterschiedliche Niveau der Emissionen für die verschiedenen Straßentypen. So ist der Ausstoß beim Straßentyp 1 durch die für diesen Straßentyp charakteristische, relativ gleichmäßige Geschwindigkeit ohne hohe Beschleunigungen am Geringsten.



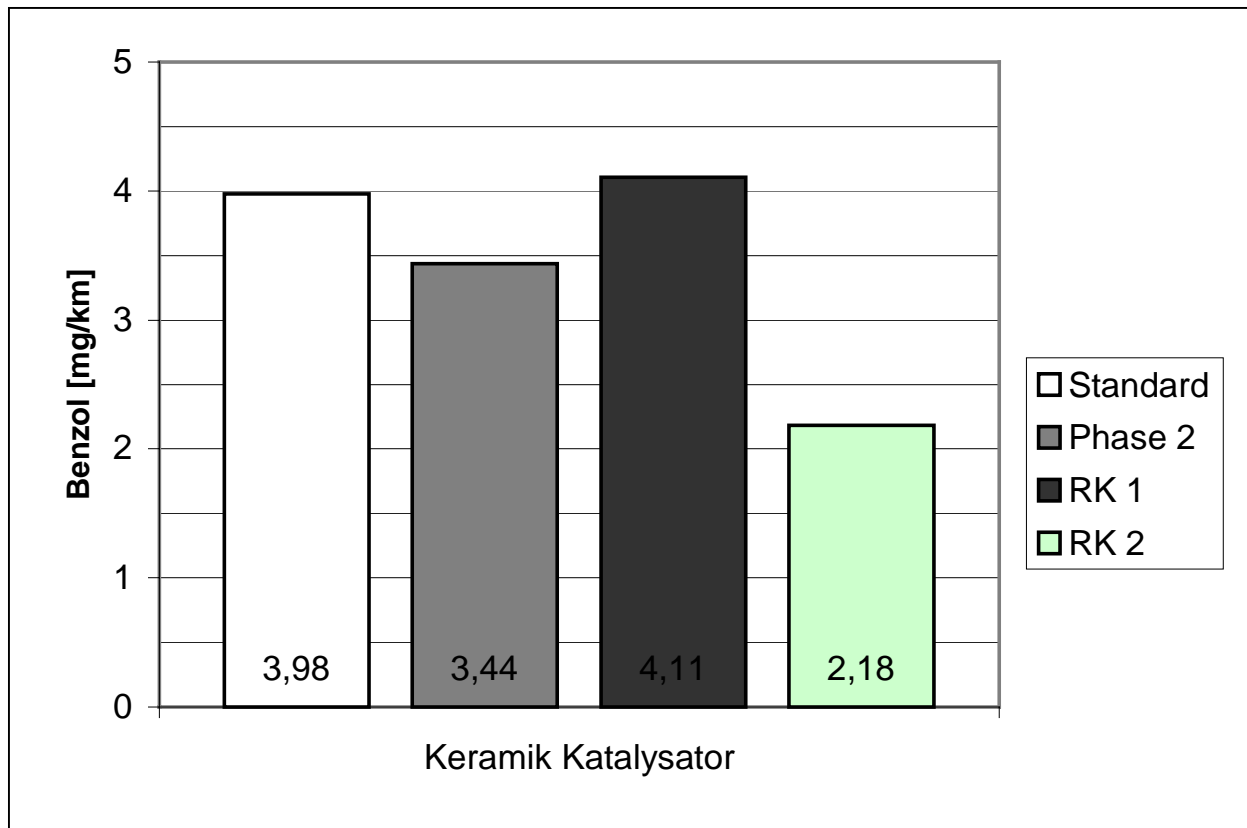
**Abbildung 4.18:** Benzol-Emissionen des Keramik Katalysator gruppiert nach Straßentypen

Im Gegensatz dazu erhöhen die beim Straßentyp 2 häufig vorkommenden Beschleunigungsvorgänge durch Ampelstops, und der durch die Steigung erhöhte Zugkraftbedarf beim Straßentyp 3 die Benzol-Emissionen bei diesen Straßentypen.

Die im Gegensatz zu den anderen Straßentypen sehr hohen Werte für den Straßentyp 4 können durch den Kaltstart und den daraus resultierenden unvollständig verbrannten Kohlenwasserstoffen erklärt werden.

**Abbildung 4.19** zeigt den Ausstoß von Benzol für die vier untersuchten Kraftstoffe als Mittelwerte der vier Streckentypen. Gegenüber dem Kraftstoff Standard beträgt die Verringerung der Benzol-Emissionen des Kraftstoffs RK 2 45,2%. Mit dem Kraftstoff Phase 2 liegt das Emissionsniveau um 13,6% niedriger. Einzig der Kraftstoff RK 1 weist einen Anstieg um 3,3% auf.

Zur Verringerung der Benzolemissionen ist nach den aufgezeigten Ergebnissen der Kraftstoff RK 2 am Geeignetsten. Nach den bisherigen Erkenntnissen und der Zusammensetzung der Kraftstoffe (**Tabelle 3.2**) war dieses Ergebnis so auch zu erwarten.



**Abbildung 4.19:** Mittelwerte der Benzol-Emissionen des Keramik Katalysator über alle Straßentypen

#### 4.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Keramikträger-Katalysator

Das Ziel der Verringerung des Ausstoßes von Distickstoffoxid bei Kraftfahrzeugen mit geregelterm Dreiwegekatalysator kann nach den dargestellten Ergebnissen am Besten mit dem Kraftstoff Phase 2 erreicht werden.

Da die Emissionen der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxid bei Verwendung dieses Kraftstoffs ebenfalls sinken, ist lediglich das Ansteigen der Stickstoffoxide, bedingt durch die Verringerung der aromatischen Kohlenwasserstoffe in diesem Kraftstoff (NO<sub>x</sub>-Aromateneffekt) als Einschränkung bei der Betrachtung der Emissionen zu sehen.

Der Kraftstoff Phase 2 spiegelt in seinem Verhalten bezüglich jedem der limitierten Schadstoffe sehr gut die bisher in diesem Bereich als gesichert geltenden Erkenntnisse wieder.

Von den Veränderungen der Komponenten im Kraftstoff (Aromaten, Olefine und MTBE) gegenüber dem Referenzkraftstoff ausgehend wäre folgendes zu erwarten:

- Durch die Verringerung der Aromaten sowie dem Zusatz von MTBE sollten die Werte für Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid im Abgas sinken. Hingegen wäre mit einem Anstieg der Stickstoffoxid-Emissionen zu rechnen. Diese Effekte sind für beide Kraftstoffkomponenten identisch.
- Die Verringerung der Olefine sollte zu einem Anstieg der Kohlenwasserstoff-Emissionen führen. Die Werte für die Stickstoffoxide sollten hingegen sinken. Keine Änderung wäre für den Ausstoß des Kohlenmonoxid zu erwarten.

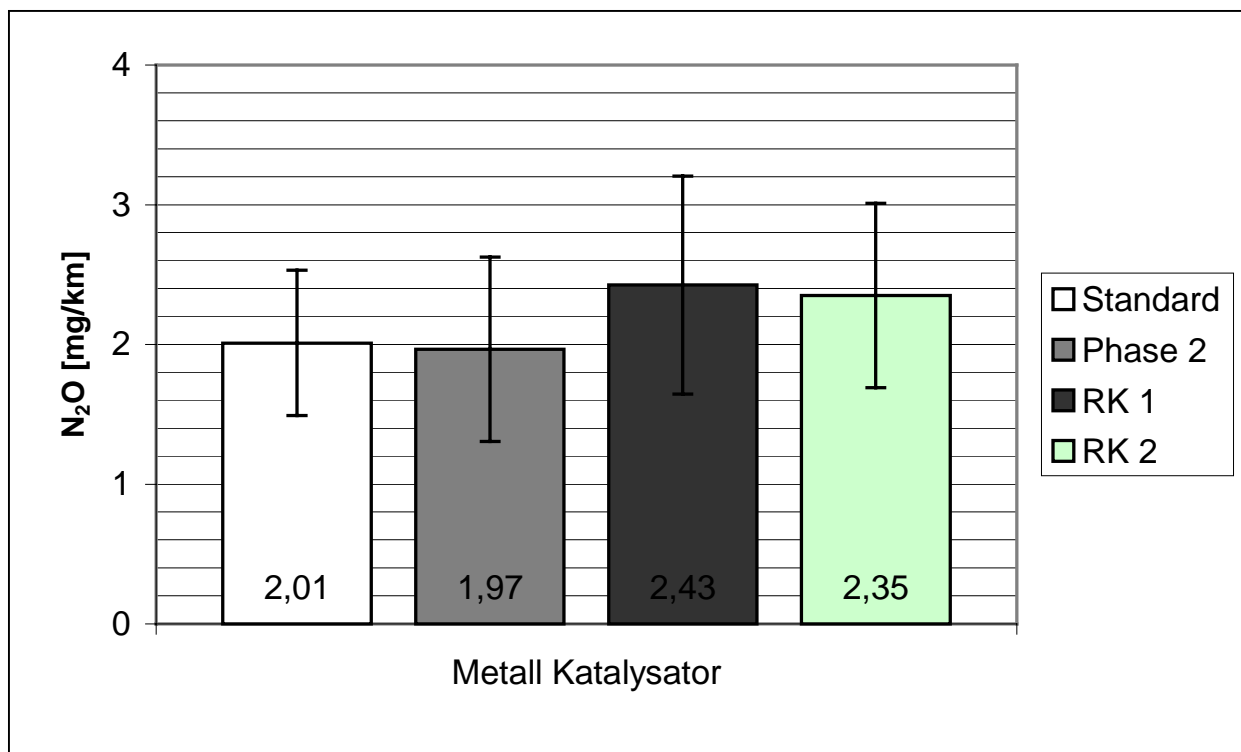
Da der Anteil der aromatischen Kohlenwasserstoffe in den Kraftstoffen Standard und Phase 2 um den Faktor 4-5 höher ist als derjenige der Olefine, sollte sich das Emissionsverhalten so einstellen, wie es für die Verringerung der Aromaten bzw. dem Zusatz von MTBE beschrieben ist. Das ist tatsächlich der Fall (Vgl. **Abbildungen 4.12** und **4.13**), es stellt sich der für die Verringerung des Aromatengehalts charakteristische  $\text{NO}_x$ -Aromateneffekt ein.

## 4.2 Einfluss der Kraftstoffe auf die Emissionen des Katalysator mit Metallträger

Katalysatoren mit Trägermaterial aus Metall haben gegenüber den herkömmlichen Keramikträger Katalysatoren den Vorteil, dass sie aufgrund der geringeren Wärmekapazität die Anspringtemperatur schneller erreichen (vgl. Kap. 2.2.2.). Damit ergeben sich für Fahrtests mit Kaltstartphase, wie dem ECE-EUDC und dem Straßentyp 4 Emissionsvorteile.

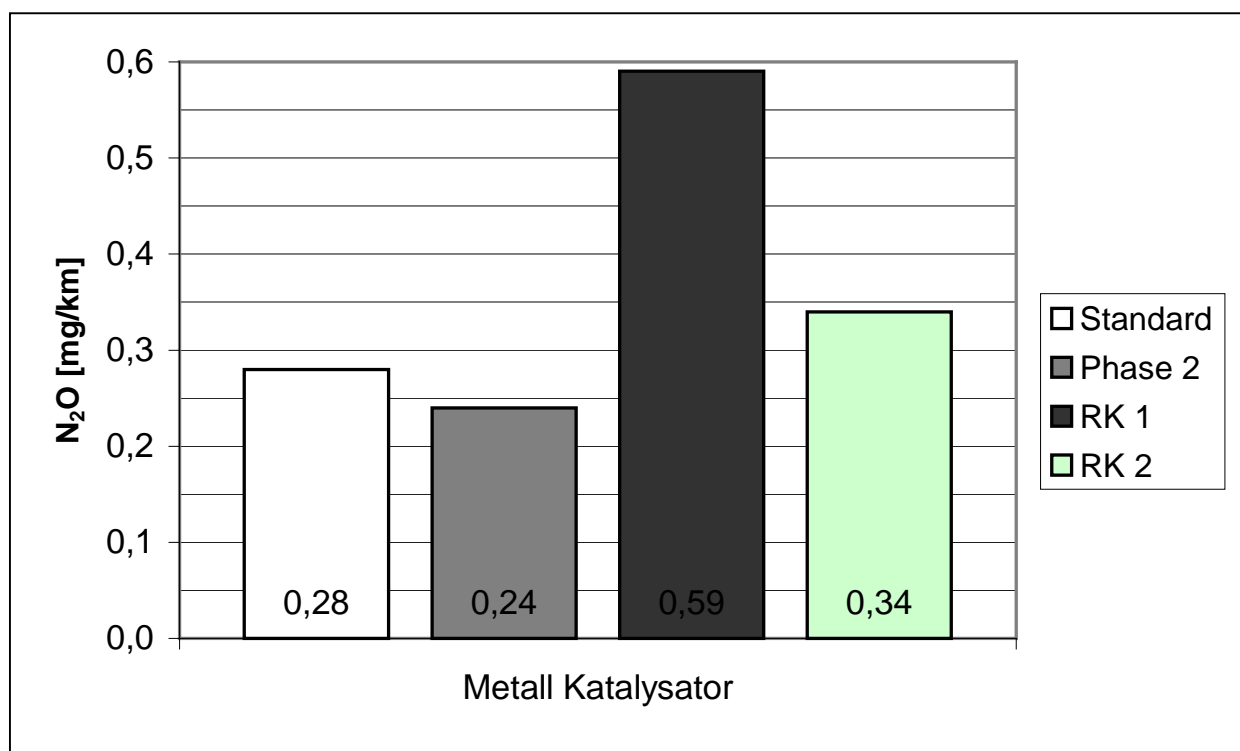
### 4.2.1 Einfluss der Kraftstoffe auf den Ausstoß von Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O)

Die Auswertung des Straßentyps 4 zeigt, dass im Vergleich zum Standardkraftstoff beim Kraftstoff Phase 2 geringfügig weniger N<sub>2</sub>O ausgestoßen wird (-2%). **Abbildung 4.20** zeigt weiter eine Zunahme der Emission für die Kraftstoffe RK 1 (+20,9%) und RK 2 (+16,9%).



**Abbildung 4.20:** N<sub>2</sub>O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 4

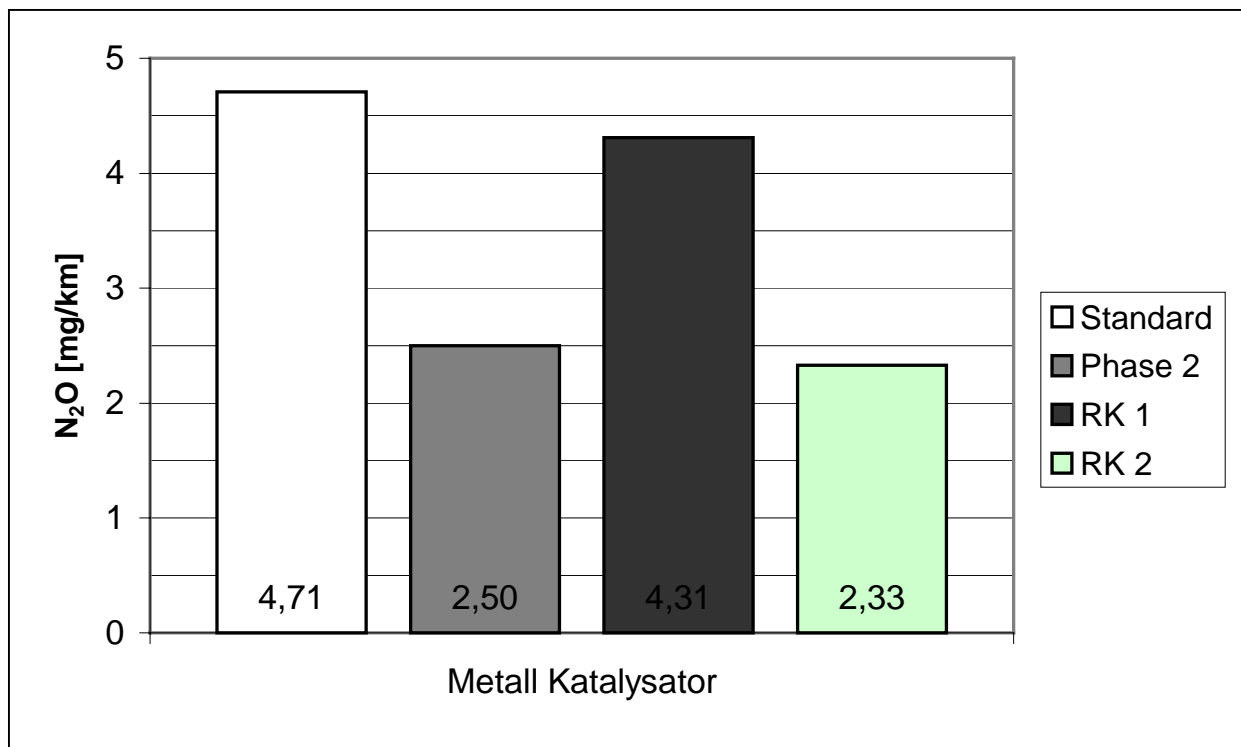
Für den Straßentyp 1 sind die Ergebnisse des Katalysators mit Metallträger in **Abbildung 4.21** dargestellt.



**Abbildung 4.21:** N<sub>2</sub>O-Emissionen des Katalysators mit Metallträger für den Straßentyp 1

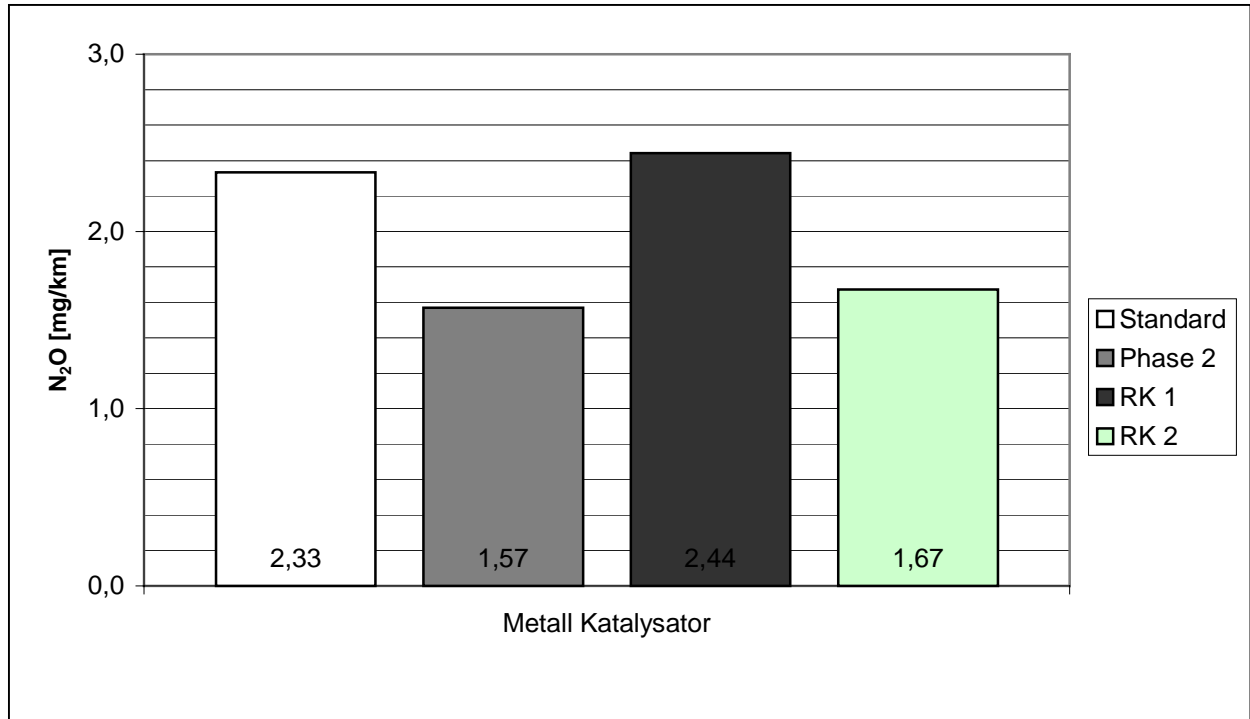
Auch hier erreicht der Kraftstoff Phase 2 mit einem Wert von 0,24 mg/km den geringsten Ausstoß. Gegenüber dem Kraftstoff Standard reduziert sich dieser um 14,3%. Die Kraftstoffe RK 1 und RK 2 emittieren, analog zum Straßentyp 4, mehr N<sub>2</sub>O als der Standardkraftstoff wobei Kraftstoff RK 1 die höchsten Emissionen aufweist. Auffällig ist die relativ hohe Zunahme des Werts für den Kraftstoff RK 1 (110,7% gegenüber dem Wert des Standardkraftstoffs). Das Emissionsniveau ist bei diesem Straßentyp jedoch auf einem sehr geringen Niveau.

**Abbildung 4.22** zeigt das Ergebnis für den Straßentyp 2. Hier ergibt sich ein etwas anderes Bild. Der Ausstoß für den Kraftstoff Standard mit 4,71 mg/km ist der höchste aller getesteten Kraftstoffe. Nur wenig geringer ist der Ausstoß für den Kraftstoff RK 1 (-8,5%). Auf einem ähnlichen Niveau befinden sich die Emissionen für die Kraftstoffe Phase 2 (-46,9%) und RK 2 (-50,5%).

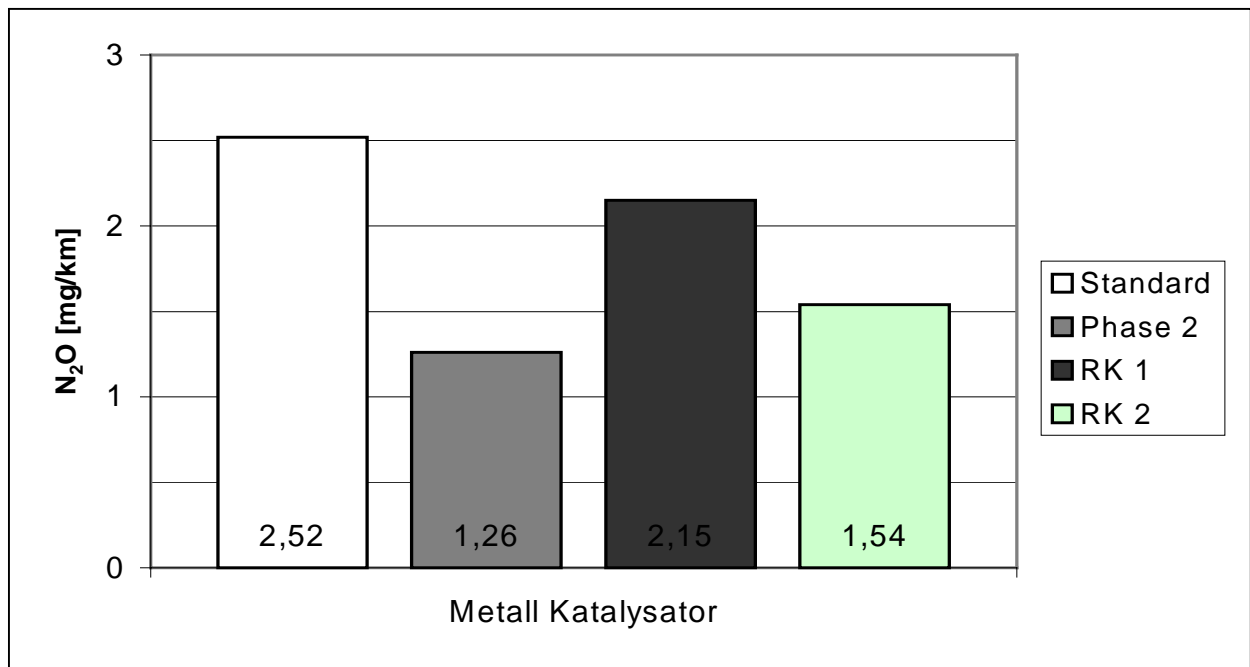


**Abbildung 4.22:** N<sub>2</sub>O-Emissionen des Katalysators mit Metallträger für den Straßentyp 2

Somit ist der Kraftstoff Phase 2 auch bei der Verwendung eines Katalysator mit Metallträger derjenige, mit den günstigsten N<sub>2</sub>O-Emissionen (**Abbildung 4.23**). Gegenüber dem Referenzkraftstoff zeigt er im Mittel über alle Straßentypen um 32,6% günstigere Werte für den N<sub>2</sub>O-Ausstoß. Beim Kraftstoff RK 2 ist die Verbesserung des Ausstoßes um 28,3% nur etwas geringer. Lediglich für den Ausstoß des Kraftstoff RK 1 ist über alle Straßentypen gesehen ein Anstieg zu verzeichnen. Dieser erreicht jedoch lediglich einen Wert von 4,7%. Dieses Ergebnis für die realen Straßentypen bestätigt somit das Ergebnis der Versuchsreihe mit Keramikträger Katalysator, welche für den Kraftstoff Phase 2 auch die niedrigsten N<sub>2</sub>O-Emissionen ergab.



**Abbildung 4.23:** Mittelwerte der N<sub>2</sub>O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger über alle Straßentypen



**Abbildung 4.24:** N<sub>2</sub>O-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den ECE-EUDC Zyklus

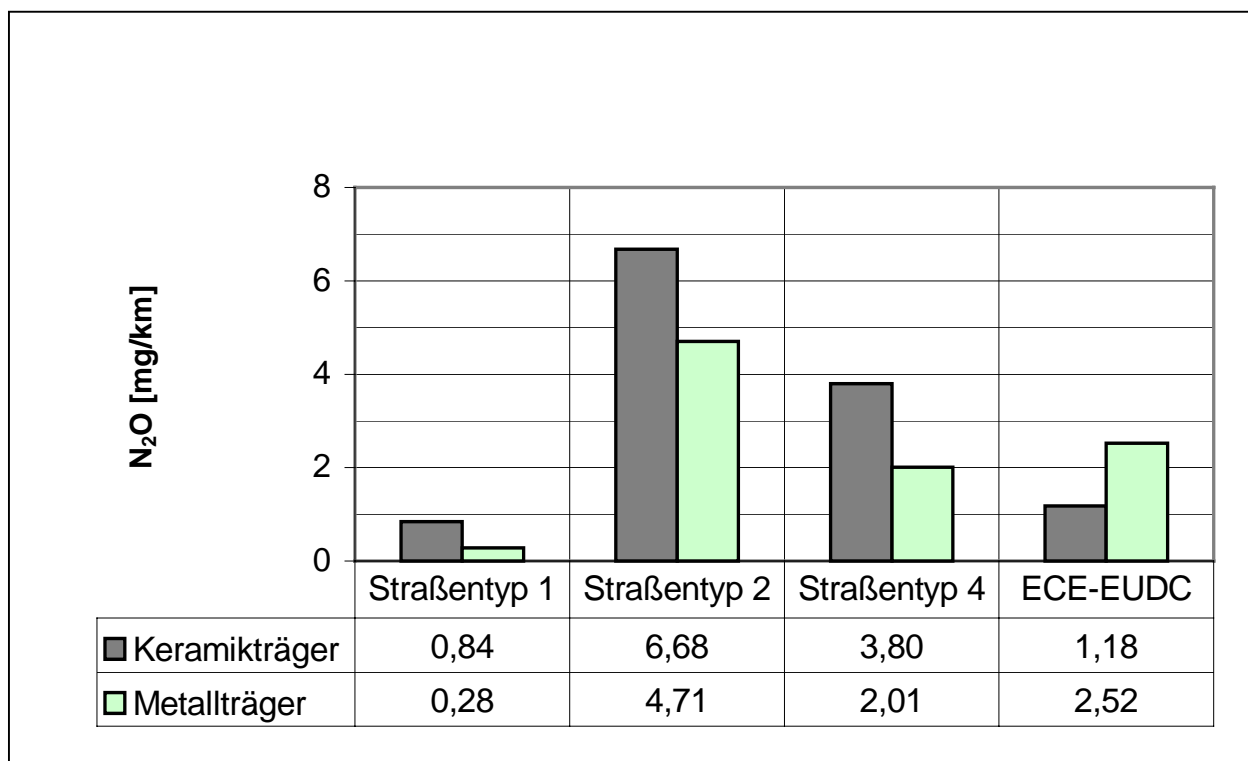


Um den Einfluss der Kaltstartphase eingehender untersuchen zu können, wird für die Messreihe mit dem Katalysator mit Metallträger der ECE-EUDC Zyklus zusätzlich dargestellt (**Abbildung 4.24**).

Der Kraftstoff Phase 2 erreicht auch bei diesem Zyklus den besten Wert. Mit einer N<sub>2</sub>O-Emission von 1,26 mg/km emittiert er die Hälfte dessen, was mit dem Referenzkraftstoff an N<sub>2</sub>O ausgestoßen wird. Der Kraftstoff RK 2 mit 1,54 mg/km erreicht eine Verringerung um 38,9%. Auch der Kraftstoff RK 1 ist mit 2,15 mg/km und einer Verminderung von 14,7% noch günstiger als der Standardkraftstoff, dessen Emission bei 2,52 mg/km liegt.

### Vergleich der Katalysatoren mit unterschiedlichen Trägermaterialien

Der Vergleich der Katalysatoren wird für N<sub>2</sub>O anhand der Versuche mit dem Standardkraftstoff durchgeführt. **Abbildung 4.25** zeigt einen Überblick über die Distickstoffoxid-Emissionen bei den Katalysatoren mit Keramik- und Metallträger für den Standardkraftstoff.



**Abbildung 4.25:** Vergleich der N<sub>2</sub>O-Emissionen der beiden Katalysatoren für den Standardkraftstoff gruppiert nach Strecken

Hier zeigt sich, dass bei den realen Straßentypen die Emissionen beim Katalysator mit

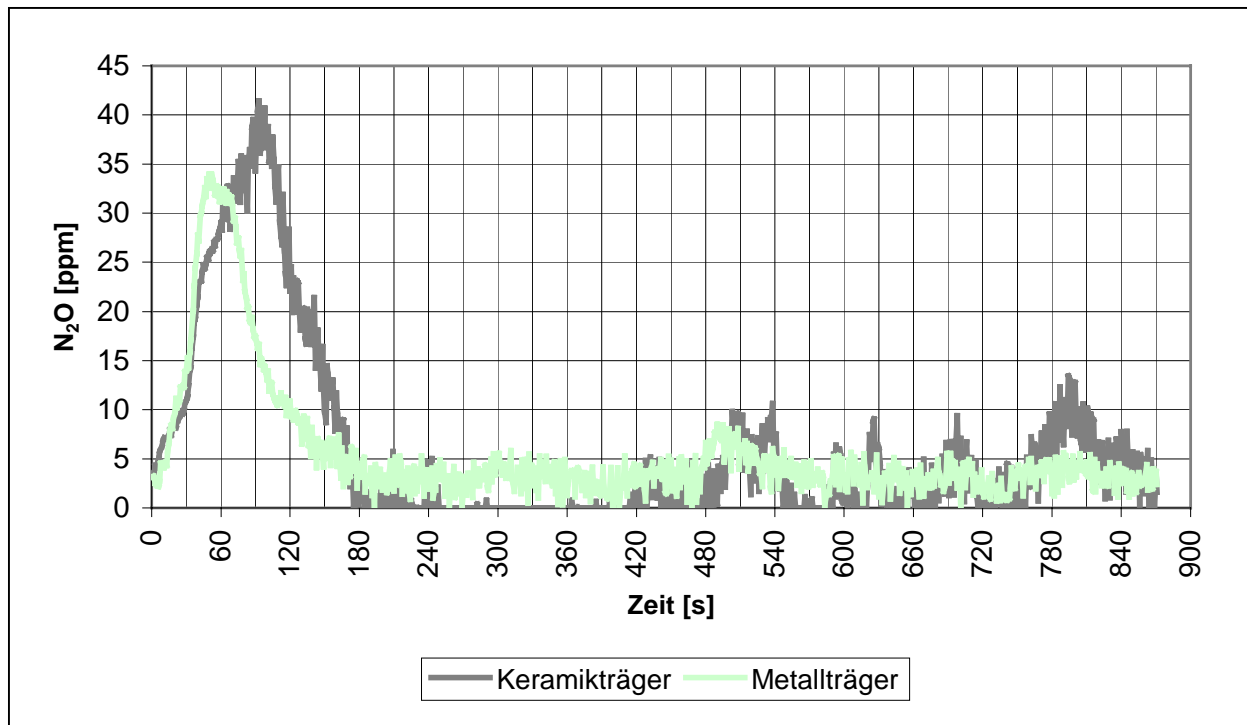
Metallträger durchweg geringer sind. Die größte Verringerung zeigt sich beim Straßentyp 1 mit 66,7%. Die Emissionen für den Straßentyp 2 reduzieren sich um 29,5%, beim Straßentyp 4 beträgt die Verringerung 47,1%. Eine Ausnahme bilden die Emissionen im ECE-EUDC Zyklus, diese sind für den Keramik Katalysator geringer. So beträgt die Steigerung des Ausstoßes für den Katalysator mit Metallträger 113,6% gegenüber dem Ausstoß des Keramik Katalysator.

Als Ursache für dieses im Vergleich zu den realen Straßentypen überraschende Ergebnis kann die Tatsache gelten, dass im ECE-EUDC Zyklus der Motor 40 Sekunden vor Fahrtbeginn ohne Last läuft. Dadurch wird der Katalysator mit Metallträger relativ lange in einem sehr ungünstigen Temperaturniveau betrieben. Da in diesem Bereich die N<sub>2</sub>O-Emissionen sehr hoch sind, ist dies für die hohen Integralwerte ausschlaggebend.

Festzuhalten ist, dass für die realen Straßentypen der Katalysator mit Metallträger bessere N<sub>2</sub>O-Emissionswerte liefert. Über die Gründe muss der Vergleich der Online aufgezeichneten Werte Aufschluss geben. Hierzu werden im Folgenden die Verläufe der N<sub>2</sub>O-Emissionen für den Standardkraftstoff und den Straßentyp 4 als Vergleich der Katalysatoren aufgezeigt. Die Analyse der Online Aufzeichnung beschränkt sich auf diesen Straßentyp, da angenommen werden kann, dass die Konvertierungsraten der beiden Katalysatoren bei Betriebstemperatur gleich sind, und sich somit nach einer Zeit von ca. 3 Minuten nach dem Motorstart kaum mehr unterscheiden. Da jedoch sämtliche Straßentypen, außer dem Straßentyp 4, einen konditionierenden Zyklus durchlaufen, sind hier keine umfassend aussagekräftigen Daten vorhanden, da die Phase der Aufheizung des Katalysators vor dem Aufzeichnungsbeginn liegt.

**Abbildung 4.26** zeigt den Vergleich der Verläufe der Emissionen des Standardkraftstoff für den Straßentyp 4. Erkennbar ist hier vor allem, dass der Verlauf für den Katalysator mit Metallträger für die Zeit zwischen Sekunde 60 und 160 deutlich niedriger ist. Weiter kann festgestellt werden, dass die Emission für diesen Katalysator ab ca. Sekunde 30 schneller bis zu einem Maximum von ca. 35 ppm ansteigt um dann auch früher wieder auf das 'Betriebsniveau' von ca. 4 ppm abzufallen. Dieses ist nach ca. 140 Sekunden erreicht.

Anders sieht der Verlauf für den Keramik Katalysator aus. Nach einem stetigen Anstieg der Emission bis Sekunde 90 erreicht der Maximalausstoß ca. 40 ppm. Erst nach ungefähr 180 Sekunden ist hier das 'Betriebsniveau' erreicht.

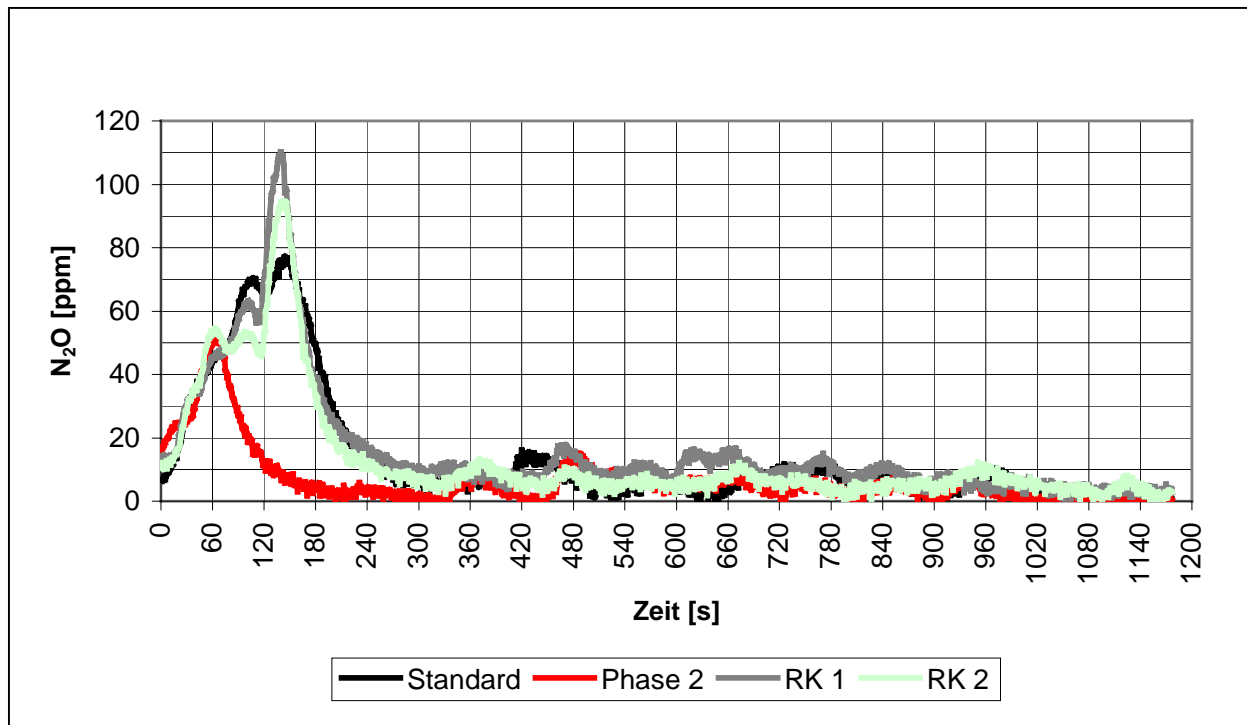


**Abbildung 4.26:** Vergleich der N<sub>2</sub>O-Emissionsverläufe von Keramik- und Metallträger Katalysator für den Kraftstoff Standard und Straßentyp 4

Interessant hier ist vor allem der Zeitpunkt der maximalen Emissionen sowie das Niveau der beiden Kurven, welche im Betriebszustand der Katalysatoren als gleich bezeichnet werden könnten. So scheint der Katalysator mit Metallträger seinen Emissionsvorteil tatsächlich vor allem aus dem Umstand zu ziehen, schneller auf Betriebstemperatur zu gelangen.

**Abbildung 4.27** stellt den Verlauf der Emissionen für alle Kraftstoffe und den Katalysator mit Metallträger im ECE-EUDC Zyklus dar.

Auffallend ist hier das im Vergleich zu den anderen Kraftstoffen abweichende Verhalten der Emissionen des Kraftstoff Phase 2, welche bereits nach 60 Sekunden zurückgehen, während die Emissionen der anderen Kraftstoffe noch weiter anwachsen. Der Anstieg auf einen Wert von ca. 50 ppm ist bei allen Kraftstoffen nahezu identisch. Danach bilden sich die drei Phasen der Konstantfahrten des ersten der vier ECE Zyklen in den Emissionen ab, wobei der Kraftstoff Phase 2 eine Ausnahme bildet.

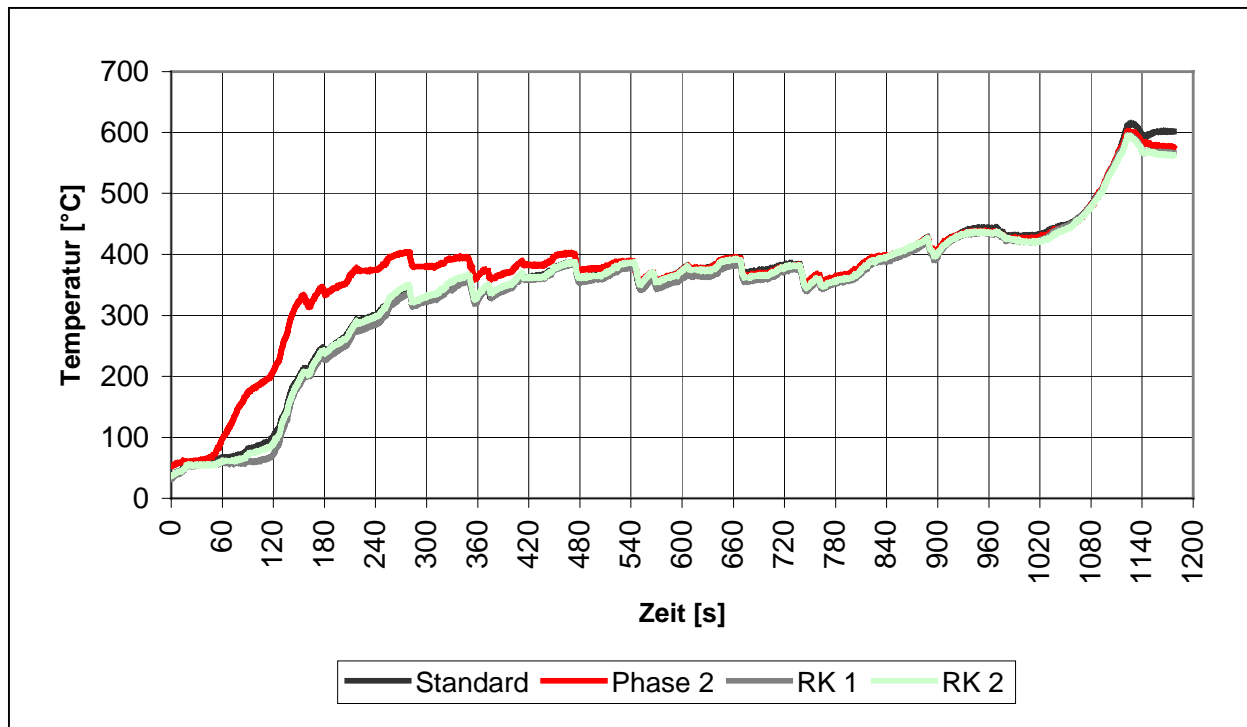


**Abbildung 4.27:** Vergleich der N<sub>2</sub>O-Emissionsverläufe des Katalysator mit Metallträger für alle Kraftstoffe im ECE-EUDC Zyklus

Obwohl schon beim zweiten relativen Maximum nach ca. 100 Sekunden die Emissionen der Kraftstoffe Standard, RK 1 und RK 2 deutlich unterschiedliche Niveaus aufweisen und dies auch zum Zeitpunkt der Höchstwerte dieser Kraftstoffe der Fall ist, folgen die Werte relativ schnell wieder dem selben Verlauf in Richtung 'Betriebszustand'. Dieser ist nach ca. 240 Sekunden erreicht und stellt sich somit erst nach dem ersten ECE Zyklus ein. Was das abweichende Verhalten für den Kraftstoff Phase 2 betrifft, so liegt hier die Ursache bei der Abgastemperatur nach dem Katalysator.

**Abbildung 4.28** stellt den Verlauf der Temperaturen nach Katalysator für alle Kraftstoffe im ECE-EUDC Zyklus dar.

Auch für den Temperaturverlauf zeigt sich eine Identität für die Kraftstoffe Standard, RK 1 und RK 2. Lediglich das Abgas des Kraftstoff Phase 2 löst sich nach ca. 40 Sekunden von dem der anderen Kraftstoffe und hat bis zum Ende des ersten ECE Zyklus eine um ca. 100°C höhere Temperatur. Bis zum endgültigen Angleich der Temperaturen vergehen ca. 540 Sekunden (9 Minuten).



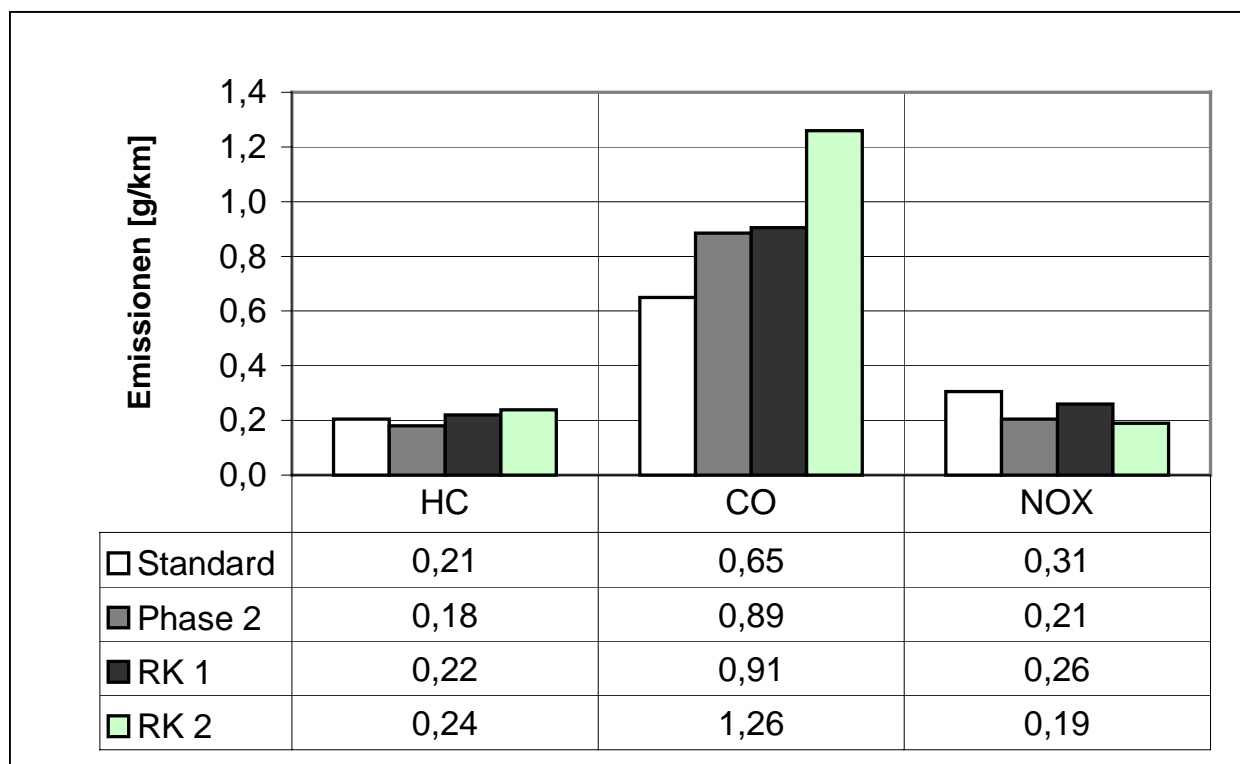
**Abbildung 4.28:** Temperaturverlauf der Abgase nach Katalysator mit Metallträger für alle Kraftstoffe im ECE-EUDC Zyklus

Die Ursache für das veränderte Temperaturverhalten beim Kraftstoff Phase 2 ist über Abweichungen in der Versuchsdurchführung nicht zu klären, die Geschwindigkeitsverläufe bei allen vier Versuchen sind identisch. Jedoch zeigt sich auch beim Temperaturverlauf vor dem Katalysator für das Abgas des Kraftstoff Phase 2 eine höhere Temperatur. Somit sollte die Ursache beim Kraftstoff selbst zu finden sein, wobei sich auch die dabei zu betrachtenden Heizwerte der Kraftstoffe nicht signifikant unterscheiden (Vgl. Anhang A, Tabelle 2).

Um zu überprüfen, ob das Ersetzen von Keramik Katalysatoren gegen solche mit Metallträger tatsächlich eine sinnvolle Alternative darstellt, muss die Wirksamkeit des Katalysator mit Metallträger auch für die gesetzlich limitierten Schadstoffe kontrolliert werden.

#### 4.2.2 Einfluss der Kraftstoffe auf den Ausstoß der gesetzlich limitierten Schadstoffe

Bei den limitierten Schadstoffen ist in Bezug auf den Katalysator ein ähnliches Verhalten zu erwarten wie beim  $N_2O$ . Durch die kürzere Zeit bis zum Anspringen des Katalysators sollten die Werte für die limitierten Schadstoffe verringert werden. **Abbildung 4.29** zeigt das Ergebnis der gesetzlich limitierten Schadstoffe für den Straßentyp 4.

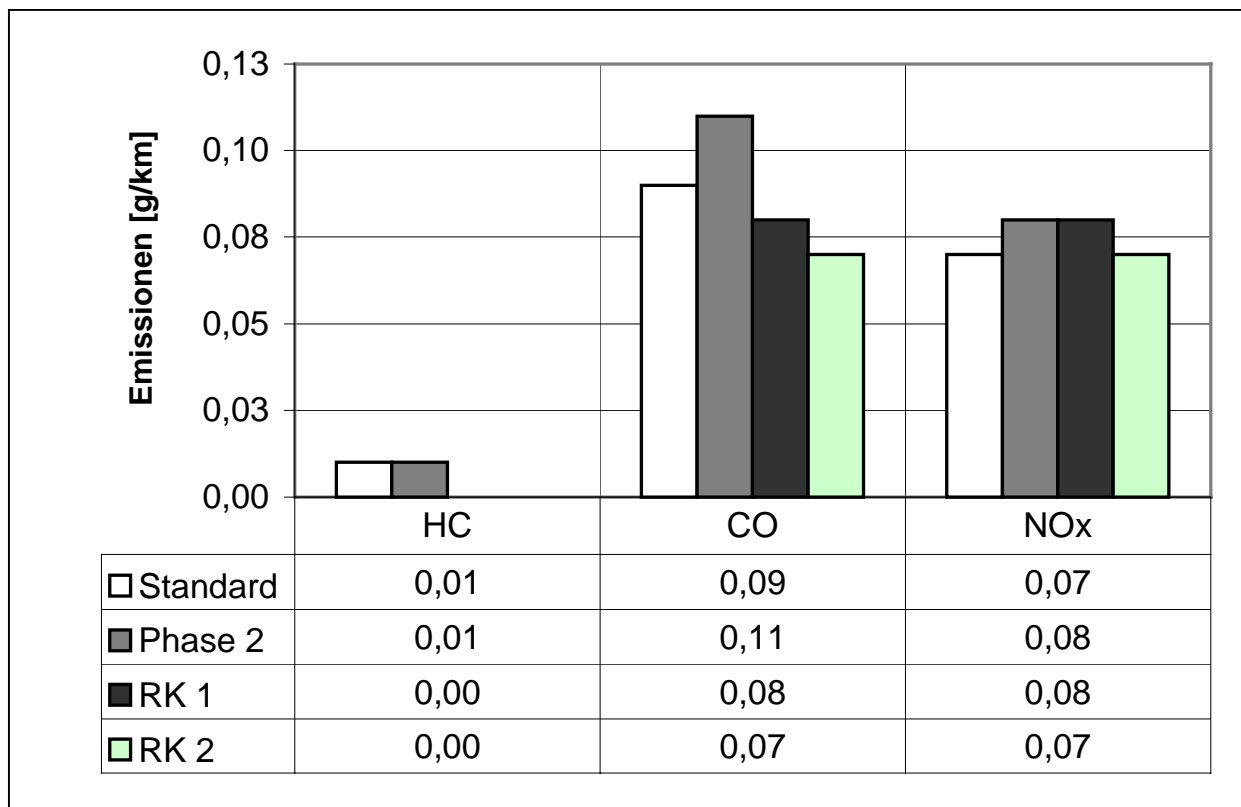


**Abbildung 4.29:** Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 4

Für die Emissionen der Kohlenwasserstoffe liegen die Werte für alle Kraftstoffe auf einem sehr ähnlichen Niveau. Nur für den Kraftstoff Phase 2 jedoch ist eine Verringerung des Ausstoßes zu erkennen, diese beträgt gegenüber dem Standardkraftstoff 14,3%. Die Emissionswerte bei den Kraftstoffen RK 1 und RK 2 steigen hingegen an (4,8% (RK 1) bzw. 14,3% (RK 2)).

Für das Kohlenmonoxid zeigen die Emissionen aller reformulierter Kraftstoffe einen deutlichen Anstieg im Bereich zwischen 36,9% für den Kraftstoff Phase 2 und 93,8% für den Kraftstoff RK 2 im Vergleich zum Standardkraftstoff.

Lediglich für die Stickstoffoxide verringern sich die Werte aller reformulierter Kraftstoffe um durchschnittlich 29% gegenüber den Emissionen des Standardkraftstoffs. Der geringste Wert wird hier vom Kraftstoff RK 2 erreicht.

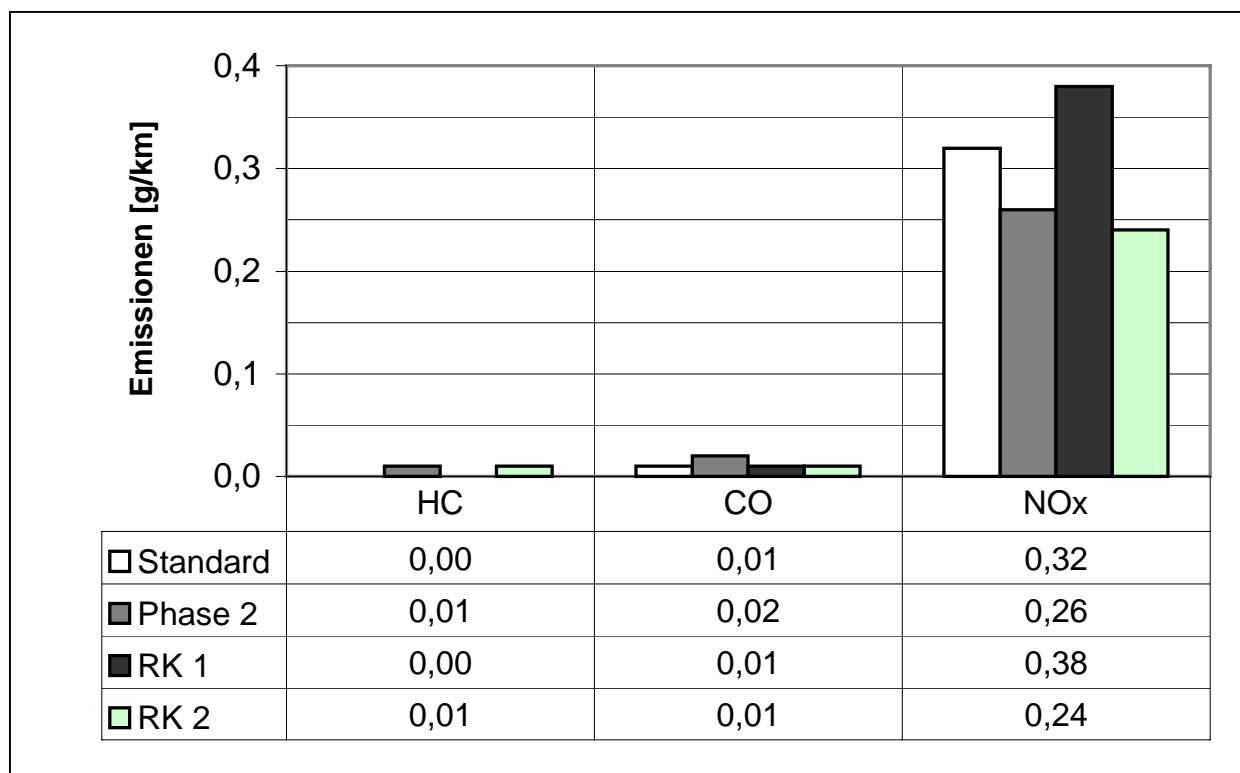


**Abbildung 4.30:** Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysators mit Metallträger für den Straßentyp 1

**Abbildung 4.30** zeigt das Ergebnis für den Straßentyp 1. Die Kohlenwasserstoffemissionen liegen nahe bzw. unter der Nachweisgrenze. Dieses Ergebnis kann auf den Streckentyp mit relativ hohen Betriebstemperaturen zurückgeführt werden. Es werden kaum unverbrannte oder nur teilverbrannte Kohlenwasserstoffe emittiert.

Die Kohlenmonoxid-Emissionen des Kraftstoff Phase 2 sind bei diesem Straßentyp höher als die des Standardkraftstoffs (+22,2%). Die Emissionen für die Kraftstoffe RK 1 und RK 2 hingegen verringern sich um 11,1% (RK 1) und 22,2% (RK 2).

Bei den Stickstoffoxiden erreicht nur der Kraftstoff RK 2 das Ergebnis des Referenzkraftstoff von 0,08 g/km. Die Kraftstoffe Phase 2 und RK 1 weisen im Gegensatz dazu um 14,3% höhere Werte aus.



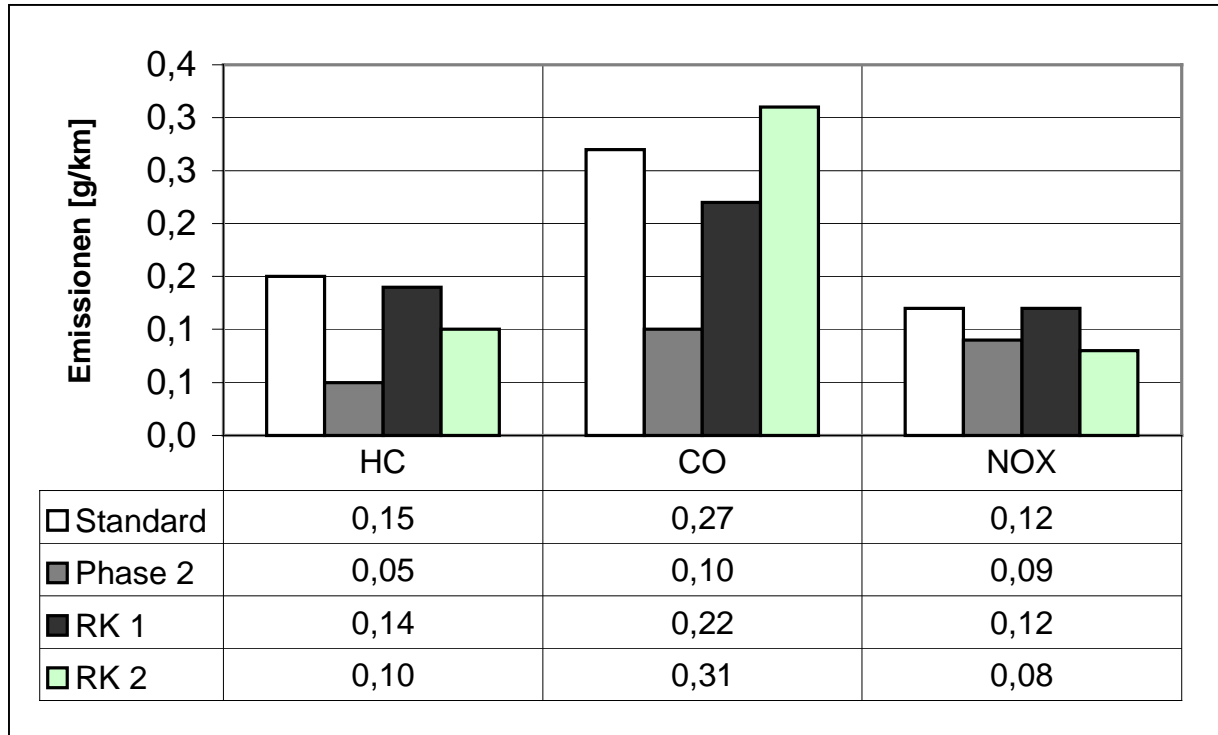
**Abbildung 4.31:** Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysators mit Metallträger für den Straßentyp 2

**Abbildung 4.31** zeigt die Emissionen für den Straßentyp 2. Hier liegen Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxidemissionen an der Nachweisgrenze des verwendeten Messaufbaus.

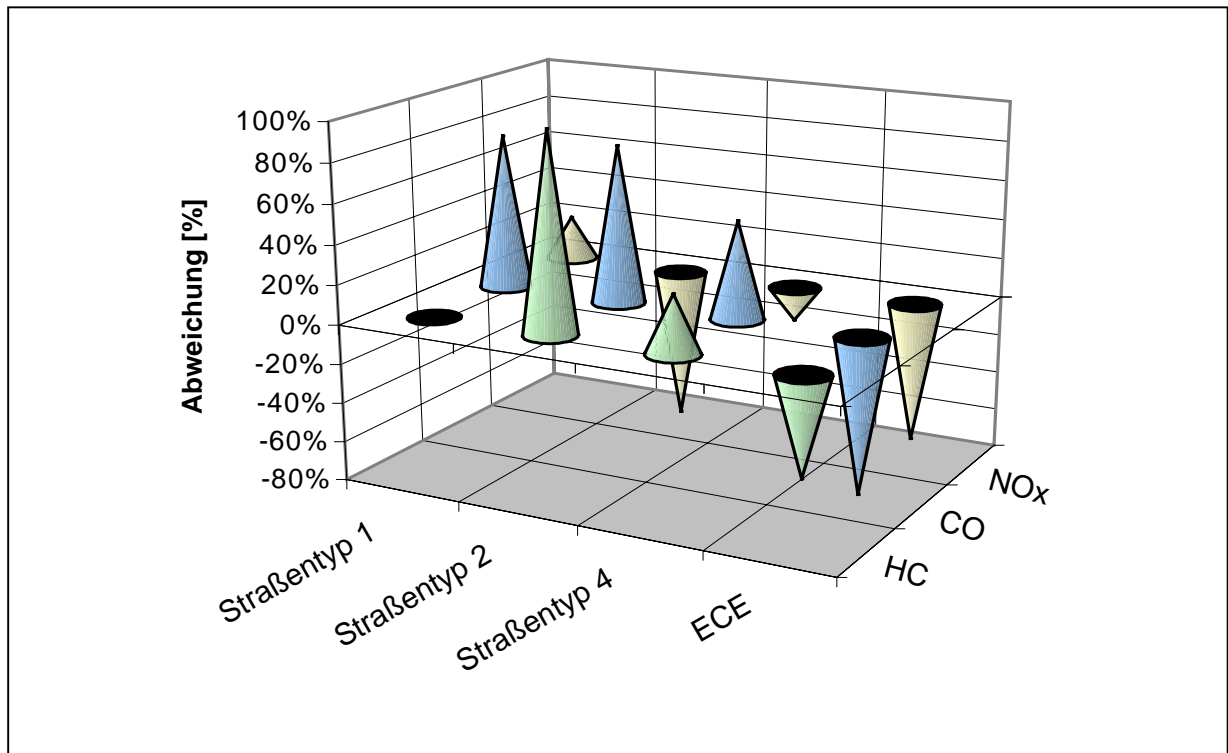
Bei den Emissionen der Stickstoffoxide sind die Werte der Kraftstoffe Phase 2 und RK 2 um 18,8% (Phase 2) bzw. 25% (RK 2) geringer als der des Standardkraftstoff. Hier weist der Kraftstoff RK 1 im Vergleich einen höheren Wert auf. Die durch ihn freigesetzte Emission beträgt 18,8% mehr als die des Referenzkraftstoff.

Die Werte des ECE-EUDC Zyklus für den Katalysator mit Keramikträger sind in **Abbildung 4.32** aufgezeigt. Es zeigt, dass die Emissionen aller gesetzlich limitierter Schadstoffe und Kraftstoffe noch innerhalb der vom Gesetzgeber geforderten Grenzen der Euro-3 Norm liegen (Vgl. **Tabelle 2.1**). Weiter ist eine Verringerung fast aller Werte der reformulierten Kraftstoffe gegenüber denen des Standardkraftstoff zu erkennen. Nur der Wert für das Kohlenmonoxid beim Kraftstoff RK 2 liegt im Vergleich etwas höher als der des Standardkraftstoff.





**Abbildung 4.32:** Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe des Katalysator mit Metallträger für den ECE-EUDC Zyklus



**Abbildung 4.33:** Vergleich der Emissionen gesetzlich limitierter Schadstoffe für den Standardkraftstoff (Metallträger zu Keramik)

Der Vergleich der Emissionen des Katalysator mit Metallträger mit denen des Keramik Katalysator für den Kraftstoff Standard wird in **Abbildung 4.33** dargestellt.

Im ECE-EUDC Zyklus liegen die Emissionen des Katalysators mit Metallträger um 50% bei den Kohlenwasserstoffen, 71% (Stickstoffoxide) bis hin zu 80% bei Kohlenmonoxid niedriger.

Aufgrund der Ergebnisse dieses Teils der Auswertung scheint sich zu bestätigen, dass die Emissionsvorteile des Katalysator mit Metallträger gegenüber dem mit Keramikträger auf das schnellere Anspringen reduziert werden können. Eine höhere Konvertierungsrate ist im 'normalen Betriebszustand' bei diesen Versuchen nicht beobachtbar. Wenn überhaupt, dann sind die Vorteile in einer geringfügig höheren Betriebstemperatur zu finden, welche verhindert, dass die Temperatur des Katalysators bei geringerer Last in einen kritischen Bereich für N<sub>2</sub>O absinkt und somit die Emissionen ansteigen lässt.

#### **4.2.3 Einfluss der Kraftstoffe auf den Ausstoß von Benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)**

Abschließend zu klären ist das Verhalten der Benzol-Emissionen für den Katalysator mit Metallträger.

Beginnend mit dem Straßentyp 4 zeigt **Abbildung 4.34** den Ausstoß für die vier Kraftstoffe.

Die Emissionen für die Reformulierten Kraftstoffe liegen alle unter denen des Standard Kraftstoffs. Für die Kraftstoffe Phase 2 und RK 1 liegt die Verringerung gegenüber diesem mit 44,8% (Phase 2) und 43,2% (RK 1) auf einem ähnlichen Niveau. Der Kraftstoff RK 2 erreicht hier mit einer Reduktion um 61,8% einen noch besseren Wert.

Das Ergebnis der Auswertung für den Straßentyp 1 ist in **Abbildung 4.35** dargestellt. Die Benzol-Emissionen für die Kraftstoffe RK 1 und RK 2 liegen unter der Nachweisgrenze, für den Kraftstoff Phase 2 liegen sie gegenüber dem des Standardkraftstoff um 57,9% höher.

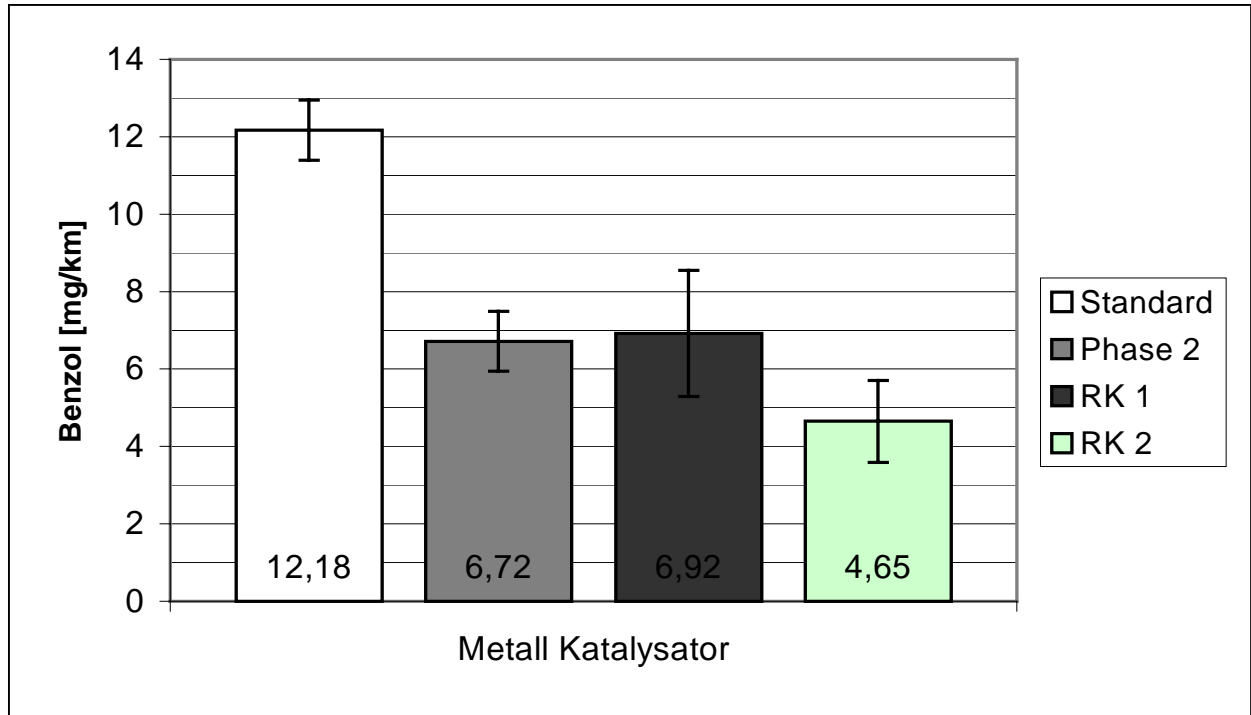


Abbildung 4.34: Benzol-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 4

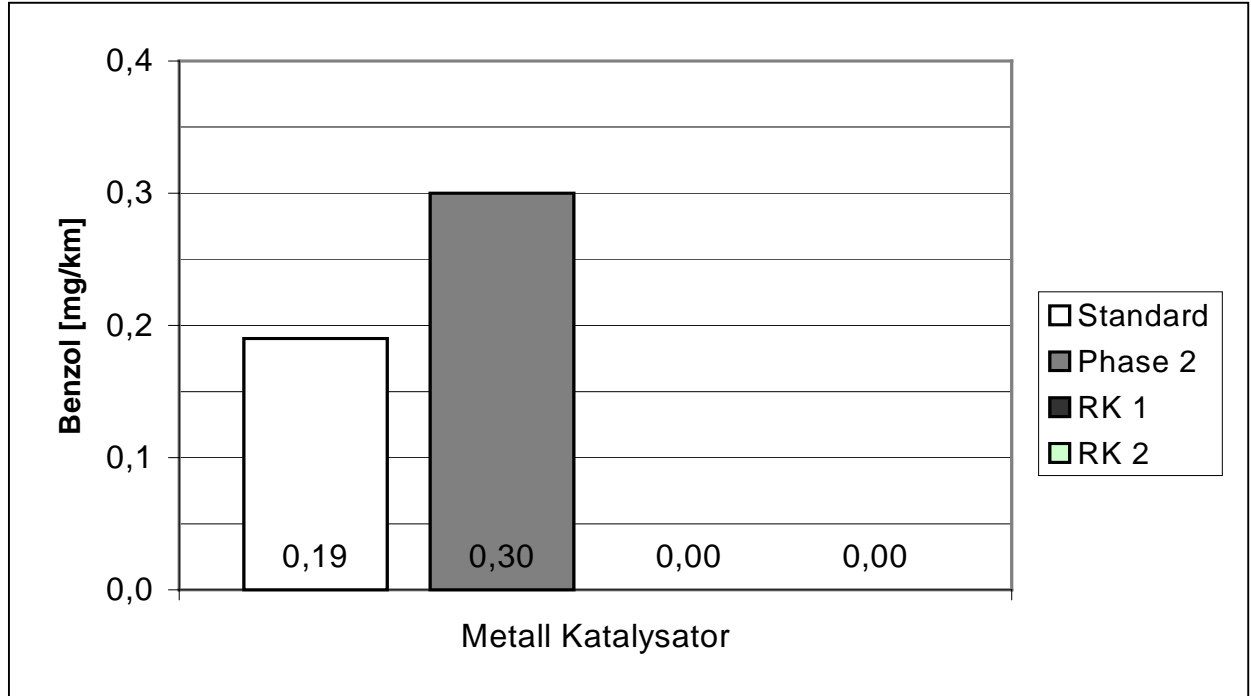
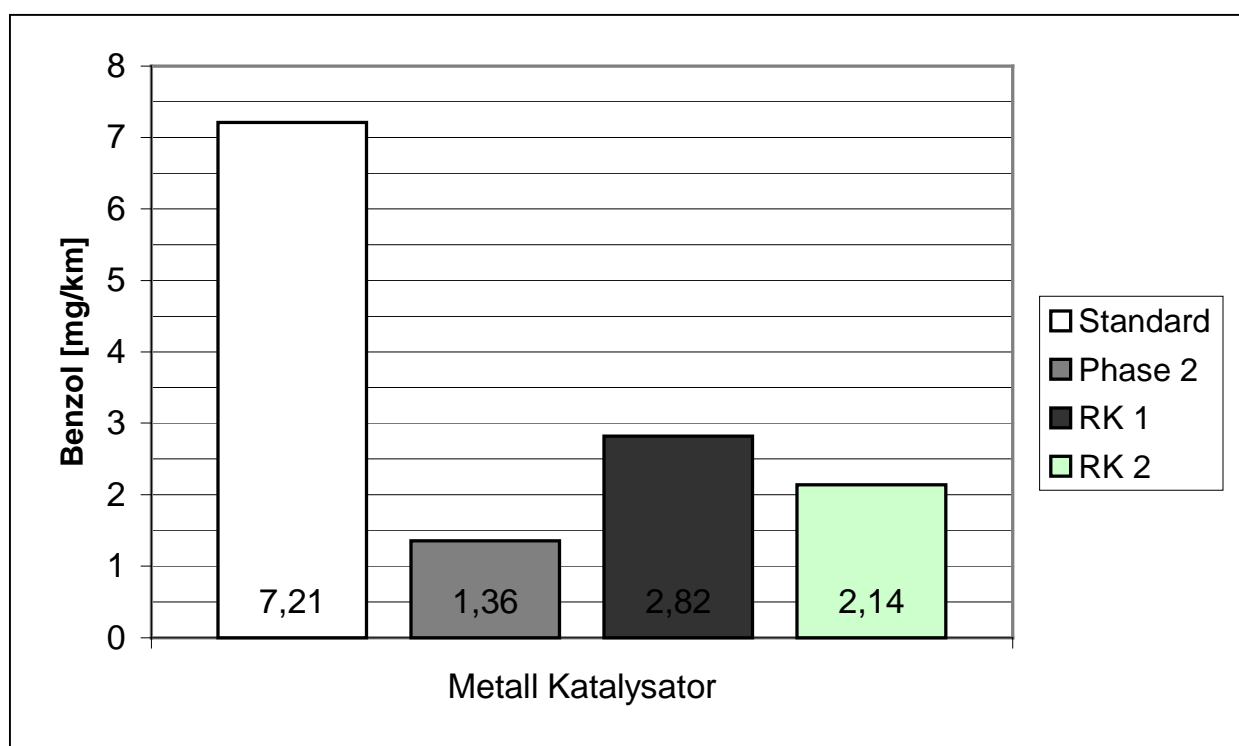


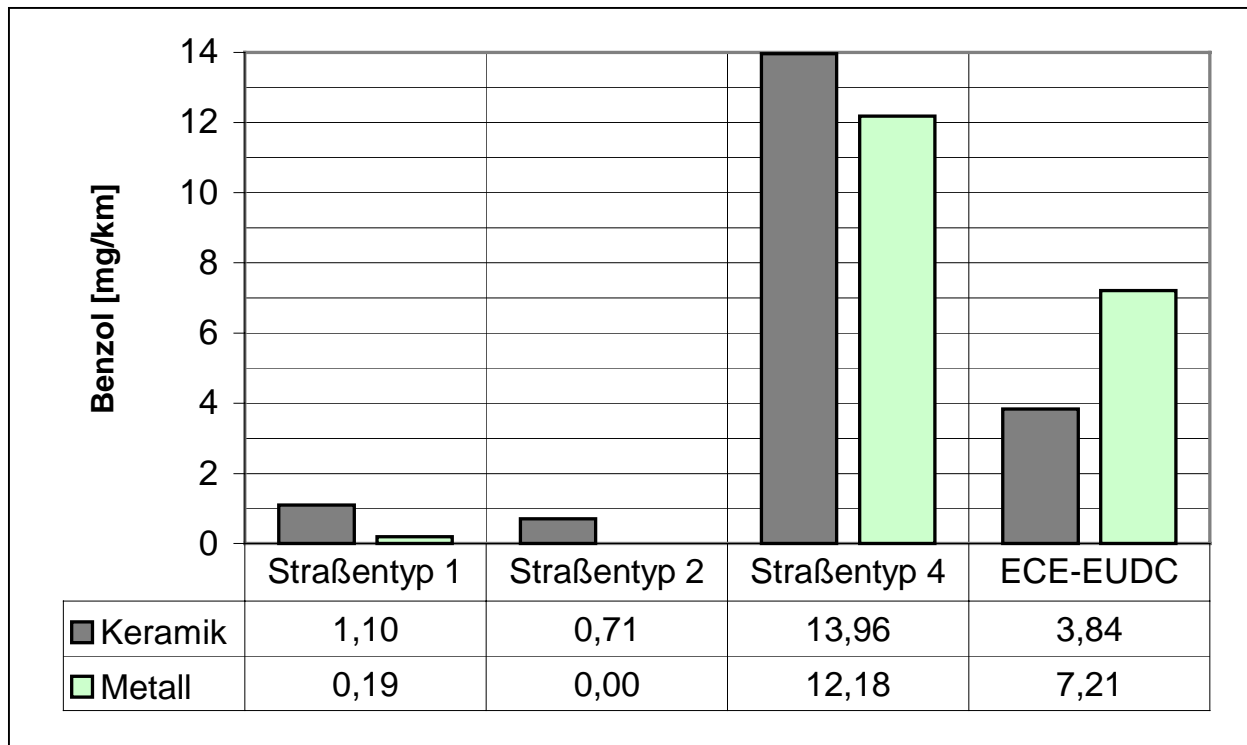
Abbildung 4.35: Benzol-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den Straßentyp 1

**Abbildung 4.36** stellt die Emissionen für den ECE-EUDC Zyklus dar. Im Vergleich zu den Emissionen des Standardkraftstoff sind die der reformulierten Kraftstoffe durchweg sehr gering. Die größte Verringerung des Benzol-Ausstoßes ist hier beim Kraftstoff Phase 2 zu finden. Er erreicht eine Reduktion der Emission um 81,1%. Nicht sehr viel schlechter gelingt dem Kraftstoff RK 2 die Verminderung der Benzol-Emission. Seine Verringerung gegenüber dem Standardkraftstoff beträgt 70,3%.



**Abbildung 4.36:** Benzol-Emissionen des Katalysator mit Metallträger für den ECE-EUDC Zyklus

Als letztes steht hier der Vergleich zwischen den Katalysatoren aus. Dieser ist in **Abbildung 4.37** dargestellt und aus Vergleichbarkeitsgründen wieder auf den Standard Kraftstoff reduziert.



**Abbildung 4.37:** Vergleich der Benzol-Emissionen der beiden Katalysatortypen für den Standardkraftstoff gruppiert nach Strecken

#### 4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Metallträger-Katalysator und Vergleich mit Keramikträger

Die Ergebnisse für die Emissionen der betrachteten Schadstoffe für den Katalysator mit Metallträger sind, im Gegensatz zu den Ergebnissen für den Katalysator mit Keramikträger, nicht ganz so einheitlich. Die bei der Gegenüberstellung der Daten von Keramik- und Metallträger Katalysator erscheinende starke Verringerung der Emissionen ist vor allem auf die Alterungserscheinungen des Katalysator mit Keramikträger zurück zu führen. Erst der Vergleich der Versuche mit vergleichbarer Kilometerleistung der Katalysatoren, wobei der Keramikträger Katalysator hier ca. 3.000 km gelaufen ist, der Katalysator mit Metallträger lediglich ca. 100 km, zeigt, dass die Unterschiede für den Standardkraftstoff bei absoluten Zahlen nicht sehr groß sind. Trotzdem stellt sich eine Verringerung bei praktisch allen Schadstoffen für die realen Straßentypen ein. Als Ausnahme tun sich hier jedoch die Stickstoffoxide hervor. Sie scheinen mit dem Metallträger Katalysator auf Unregelmäßigkeiten im Geschwindigkeits- und Lastverhalten am stärksten zu reagieren. Bei extremem Wechsel dieser beiden Faktoren, wie das beim ECE-EUDC Zyklus der Fall ist, scheint dieses Verhalten dann allen Schadstoffen eigen zu sein. Bei diesem Fahrprofil ist bei allen untersuchten Schadstoffen eine Zunahme für den Katalysator mit Metallträger ersichtlich. Diese Beobachtung ist allerdings beschränkt auf den

Standardkraftstoff. Für die reformulierten Kraftstoffe kann eine Aussage hier nicht gemacht werden, da eine Vergleichbarkeit nicht gewährleistet ist. Weiterhin ist davon auszugehen, dass der Emissionsvorteil des Katalysator mit Metallträger sich verringert, wenn der zwar Geringe, aber doch vorhandene Laufleistungsunterschied der Katalysatoren eliminiert würde. Dieser liegt bei einer Zunahme von ca. 6,2%/1000 km im Bereich bis 30.000km für den Keramikträger Katalysator und das Distickstoffoxid<sup>10</sup>. Dieser nicht repräsentative Wert über eine lange Fahrstrecke von 27.000 km sollte jedoch nicht konstant über die Lebensdauer eines Fahrzeugs angelegt werden können. Vielmehr sollte der Wert mit der Laufleistung eines Fahrzeugs abnehmen. Aus diesem Grund kann der wahrscheinlich viel höhere Wert der Zunahme der Emissionen für den Bereich bis 3.000 km nicht ermittelt, und die wahre Emissionsverringering für den Katalysator mit Keramikträger nicht als theoretischer Wert berechnet werden. Die Vorteile des Katalysator mit Keramikträger sind, anders als in der Literatur beschrieben, auf die Phase bis zur Anspringtemperatur beschränkt. Eine höhere Konvertierungsleistung konnte bei diesen Versuchen nicht beobachtet werden.

Den insgesamt geringen Emissionen beim Katalysator mit Metallträger muss zugeschrieben werden, dass die Emissionsmuster der Schadstoffe untereinander, anders als von den Ergebnissen des Katalysator mit Keramikträger bekannt, hier nicht mehr auftauchen. Dies verhindert eine einheitliche Aussage für die Emissionen der unterschiedlichen Kraftstoffe. Jedoch scheinen die Kraftstoffe Phase 2 und RK 2 für eine Verringerung der Emissionen bei Fahrzeugen mit Metallträger Katalysator geeigneter als der Kraftstoff RK 1. Im Vergleich mit dem Standardkraftstoff sind sie überwiegend emissionsärmer, wobei bei einer Priorität der Verringerung von Distickstoffoxid dem Kraftstoff Phase 2 der Vorzug gegeben werden muss, bei einer Verringerung der Benzolemissionen zeigt sich hingegen der Kraftstoff RK 2 als effektiver. Dieser erreicht auch bei einer Kombination beider Maßnahmen die besten Ergebnisse für beide nicht limitierte Schadstoffe. Insgesamt zeigt sich jedoch für beide Kraftstoffe ein Zielkonflikt mit dem Kohlenmonoxid beim Straßentyp 4, sowie mit den Stickstoffoxiden durch den NO<sub>x</sub>-Aromateneffekt.

---

<sup>10</sup> Unterschied der Emissionen der Fahrzeuge in Bezug zur unterschiedlichen Laufleistung.

### 4.3 Bewertung der untersuchten Kraftstoffe

Wie in Kapitel 3 beschrieben, sind zwei der vier untersuchten Kraftstoffe reguläre Handelsware. Wobei zu beachten ist, dass der Kraftstoff Phase 2 in Teilen der USA im Rahmen der Clean Air Act-Programme zur Verbesserung der Luftqualität eingeführt wurde und nur dort an Tankstellen zu erhalten ist. Dieser Kraftstoff hat eine spezielle Zusammensetzung für niedrige Schadstoffemissionen und damit den Bezeichnung „Reformulierter Kraftstoff“ erhalten. Die beiden weiteren Kraftstoffe des vorliegenden Untersuchungsprogramms sind selbstdefinierte Mischungen, die zur Variation der Kraftstoffparameter Aromatengehalt und MTBE das Messprogramm ergänzen.

Eine wichtige Fragestellung dieser Untersuchung ist, ob der US-amerikanische „Clean Fuel“ Kraftstoff (Phase 2) ohne negative Auswirkungen auf die Emissionen in einem Fahrzeug neuerer Bauart des europäischen Marktes eingesetzt werden kann und damit eine Verbesserung der Schadstoffemissionen in dem Maße erreicht wird, das eine Einführung anzustreben ist. Wie die Auswertung in den Kapiteln 4.1 mit dem Serienkatalysator zeigt, stehen einer Reduktion der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxid um ca. 8% (Mittelwerte über die untersuchten Straßentypen) eine Erhöhung der Stickoxide um ca. 10% gegenüber. Dieses Verhalten findet sich auch in der Literatur wieder [MANN (1997)], jedoch zeigt der Sonderkraftstoff RK2, der eine dem Phase 2 Kraftstoff vergleichbare Zusammensetzung aber ohne MTBE-Zusatz hat, dass der  $\text{NO}_x$ -Anstieg nicht unbedingt mit dem MTBE-Zusatz und damit dem Sauerstoffanteil im Kraftstoff zusammenhängt. Die Verminderung der Kohlenwasserstoffemission ist ebenfalls nicht auf den Sauerstoffanteil im Kraftstoff als vielmehr auf den niedrigen Aromatenanteil zurückzuführen. Der Sonderkraftstoff RK2 hat ohne MTBE-Zusatz und einem Aromatenanteil von 24,70 vol% eine den drei anderen Kraftstoffen entsprechende Klopfestigkeit von 95 ROZ. Der Vorteil des MTBE zeigt sich nur bei den  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen, hier liegt wider Erwarten der Phase 2-Kraftstoff um ca. 40% unterhalb der Werte des Standard- und RK2-Kraftstoffs.

Zusammenfassend lässt sich folgendes Aussagen:

- Der Kraftstoff Phase 2 verbessert deutlich die  $\text{N}_2\text{O}$ - und Benzol-Emissionen. Der Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Emissionen kann eine veränderte Motorabstimmung erforderlich machen, die die Vorteile bei den Kohlenwasserstoffen und beim Kohlenmonoxid vermindert.
- Bis zu einer Klopfestigkeit von ROZ 95 können Kraftstoffe ohne klopfestigkeitssteigernde Additive wie MTBE dargestellt werden, die ohne mögliche Gefahren des Additives für die Umwelt eine insgesamt positive Schadstoffbilanz gegenüber einem heute üblichen Standardkraftstoff aufweisen. Die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen sind dabei denen des regulären Kraftstoffs vergleichbar.

## 5. Zusammenfassung

Ziel dieses Vorhabens ist die Analyse der Wirkung von reformulierten Kraftstoffen auf die Emissionen von Schadstoffen in Abgasen moderner Personenkraftwagen in realen Fahrprofilen. Als reformulierter Kraftstoff zur Verbesserung der Schadstoffemissionen wird der als „Clean Fuel“ bezeichnete US-amerikanische Ottokraftstoff Phase 2 im Vergleich mit einem handelsüblichen Markenkraftstoff untersucht. Der reformulierte Kraftstoff zeichnet sich durch einen niedrigen Aromatengehalt und den Zusatz einer sauerstoffhaltigen Komponente (MTBE - Methyl-Tertiär-Butyl-Ether) aus. Um Aussagen zum Einfluss der Aromatenabsenkung bzw. des MTBE-Zusatzes machen zu können, wurden zwei weitere Kraftstoffe ins Messprogramm aufgenommen. Der Erste (RK1) entspricht in Bezug auf den Aromatengehalt dem handelsüblichen Kraftstoff, enthält jedoch zusätzlich MTBE. Der Zweite (RK2) hat den niedrigen Aromatengehalt entsprechend dem Phase 2-Kraftstoff jedoch ohne MTBE-Zusatz.

Die Messungen wurden auf dem Abgasrollenprüfstand des Forschungsinstituts für Kraftfahrzeugwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart durchgeführt. Als Fahrprofile kamen der ECE-EUDC-Zyklus sowie vier aus realen Fahrten im Ballungsraum Stuttgart gewonnene Fahrkurven [HITZLER & ESSERS (1997)] zum Einsatz.

Mit dem für Fahrzeugtypprüfungen üblichen CVS-Verfahren wurden während der Prüfläufe Abgasproben gesammelt und mit einem FTIR-Mehrkomponentenmessgerät sowie einem Flammenionisationsdetektor die integralen Schadstoffkonzentrationen ermittelt. Neben den gesetzlich limitierten Komponenten Gesamtkohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Stickstoffoxide wurden vor allem die Emissionen an Distickstoffoxid und Benzol betrachtet. Die Ermittlung der Aromatenkonzentration (Benzol, Toluol, Xylol) erfolgte am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart mit einem Gaschromatographen. Die Probennahme auf Aktivkohle wurde mit einem separaten Absaugsystem aus dem verdünnten Abgas der CVS-Anlage realisiert.

Zur Darstellung der Bildung von Distickstoffoxid im Katalysator wurde kontinuierlich während der Fahrten an Entnahmestellen vor und nach Hauptkatalysator unverdünntes Abgas entnommen und analysiert. Um die bei dem verwendeten Messverfahren der Nichtdispersiven Infrarotanalyse auftretende Querempfindlichkeit zu korrigieren, wurden parallel die Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid und -dioxid ermittelt.

Im Messprogramm wird bei den Katalysatoren die Art des Trägermaterials unterschieden. So wird, außer dem in der Mehrheit der Fahrzeuge eingesetzten Katalysator mit Keramikträger, auch ein Katalysator mit Metallträger betrachtet.



## Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass mit reformulierten Kraftstoffen eine Verringerung der Emissionen gesetzlich nicht limitierter Schadstoffe erreicht werden kann. So können die Distickstoffoxid-Emissionen allein durch die Verwendung des Kraftstoff Phase 2 im Durchschnitt um 41% gesenkt werden. Mit dem noch neuen Metallträger-Katalysator beträgt die durchschnittliche Verringerung der Emissionen unter Verwendung des Kraftstoff Phase 2 ca. 56%.

Bei den Benzolemissionen zeigt sich das erwartete Ergebnis. Der Kraftstoff RK2 mit niedrigem Aromatengehalt und unter diesen Aromaten auch nahezu benzolfrei führt in den Tests zu den niedrigsten Benzolemissionen im Abgas. Mit dem Clean Fuel ist im Mittel über die Messungen mit den vier realen Fahrtverläufen eine Reduktion der Benzolemissionen von 20% gemessen worden. Dieses Ergebnis wird allerdings dominiert von den hohen Emissionsfaktoren für den Straßentyp Tempo-30-Zone. Insgesamt zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Benzolemissionen vom Fahrprofil und dabei ein uneinheitliches Ergebnis beim Vergleich der verschiedenen Kraftstoffe.

Bei den Emissionen des Distickstoffoxid liegen die Ergebnisse aus Fahrprofil 1, mit der höchsten Durchschnittsgeschwindigkeit, im Vergleich mit den drei anderen realen Fahrprofilen auf niedrigerem Niveau. Der in Fahrprofil 4 (Tempo-30-Zone) enthaltene Kaltstart hat keine Auswirkung auf die N<sub>2</sub>O-Emission. Der Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung auf den N<sub>2</sub>O-Emissionsfaktor ist wie oben beschrieben sehr groß, vom Fahrprofil aber nahezu unabhängig.

Das Ersetzen des Keramikträger Katalysator gegen den mit Metallträger liefert nicht in jedem Fall eine Verringerung der Emissionen. Dies ist dem Umstand zuzuschreiben, dass die Emissionen bei diesem Katalysator relativ gering sind, und sich somit Streuungen und geringe Unterschiede in großen Relationen ausdrücken. Erstaunlich ist, dass bei der Substitution die Werte für alle Schadstoffe, auch die der gesetzlich limitierten Schadstoffe, im ECE-EUDC Zyklus für den Standardkraftstoff entgegen den Erwartungen ansteigen.

Der Kraftstoff Phase 2 spiegelt in seinem Verhalten bezüglich jedem der limitierten Schadstoffe sehr gut die bisher in diesem Bereich als gesichert geltenden Erkenntnisse wieder.

Von den Veränderungen der Komponenten im Kraftstoff (Aromaten, Olefine und MTBE) gegenüber dem Referenzkraftstoff tritt erwartungsgemäß folgendes ein:

- Durch die Verringerung der Aromaten sowie dem Zusatz von MTBE sinken die Werte für Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid im Abgas. Hingegen ist mit einem Anstieg der Stickstoffoxid-Emissionen zu rechnen.

Die drei reformulierten Kraftstoffe weisen gegenüber dem Standardkraftstoff bei CO ein um ca. 8% niedrigeres und bei NO<sub>x</sub> ein um ca. 10% höheres Emissionsniveau auf. Bei den Kohlenwasserstoffen liegen die beiden aromatenarmen Kraftstoffe um 10% unter dem Emissionsniveau des Super-Kraftstoffs.

Die Verringerung der Emissionen von Distickstoffoxid bei Kraftfahrzeugen mit geregelter Dreiwegekatalysator kann nach den dargestellten Ergebnissen am Besten mit dem Kraftstoff Phase 2 erreicht werden.

Da die Emissionen der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxid bei Verwendung dieses Kraftstoffs ebenfalls sinken, ist lediglich das Ansteigen der Stickstoffoxide, bedingt durch die Verringerung der aromatischen Kohlenwasserstoffe in diesem Kraftstoff ( $\text{NO}_x$ -Aromateneffekt) als Einschränkung bei der Betrachtung der Emissionen zu sehen.

Um diese Problematik besser beleuchten zu können sollten ergänzende Untersuchungen am Motorenprüfstand durchgeführt werden. Hier könnten Messungen zeigen inwieweit sich durch eine geänderte Motorabstimmung die Stickoxide mit Kraftstoff Phase 2 auf das Niveau des Super Kraftstoffs senken lassen, ohne nennenswerte Nachteile bei anderen Schadstoffen zu erhalten.

Der Kraftstoff Phase 2 zeigt im gesetzlichen Fahrzyklus wie auch in den realen Fahrkurven ein hohes Potential zur Emissionssenkung. Für den nichtlimitierten Schadstoff  $\text{N}_2\text{O}$  sind die erwarteten Nachteile im Warmlauf bzw. bei niedrigster Motorlast, wie z.B. in Temo-30-Zonen üblich, nicht aufgetreten.

Da es bei unsachgemäßem Umgang mit MTBE-haltigen Kraftstoffen oder mit dem Additiv selbst es zu einer Anreicherung dieses Stoffes in Gewässern kommen kann, ist es von Vorteil wenn mit einer Kraftstoffzusammensetzung ohne das Additiv die positiven Eigenschaften bezüglich der Emissionen erreicht werden können. Der Kraftstoff RK 2 hat hierbei gezeigt, dass allein durch die Absenkung der Aromaten, bei einer vorgegebenen Klopfestigkeit von 95 ROZ, eine nennenswerte Verbesserung der Schadstoffemissionen möglich ist.



## 6. Literaturverzeichnis

Bücher, Zeitschriften, wissenschaftliche Arbeiten

BECKER, R. F. (1996): Potential zur Verbesserung des Abgasverhaltens konventioneller Kraftstoffe. Mobil Oil Co. Ltd , Vortrag TAE, Kraftstoffe und ihre Anwendung in Otto- und Dieselmotoren. Technischen Akademie Esslingen, 1996.

BRUNER, I.; J. M. LEPEU (1994): Das Europäische Programm über Emissionen, Kraftstoffe und Motortechnologien. 15. Internationales Wiener Motoren Symposium, April 1994.

CLOSSEY, J.; J. DEJOVINE (1992): The EC - X test Program. Reformulated Gasoline for Lower Vehicle Emission. SAE - Paper No. 920798, 1992.

DASCH, J. M. (1992): Nitrous Oxide Emissions from Vehicles. General Motors Research Laboratories, Warren, Michigan. Journal of the Air Waste Management Association Vol. 42, No.1, S. 63 – 67, Pittsburg 1992.

EU-1 (1998): Qualität von Otto- und Dieselmotoren. Europäische Union, Richtlinie 98/70/EG, Amtsblatt L 350, 28.12.1998.

FREY, V. (1993): Untersuchungen zu Emission und Umsatz von stickstoff- und schwefelhaltigen Verbindungen aus einem Ottomotor mit Abgaskatalysator. Dissertation, TU Claustal, 1993.

GIFHORN, A.; R. MEYER-PITROFF (1998): Einfluß abgasspezifischer Parameter auf die N<sub>2</sub>O-Bildung am Pd/Rh-Katalysator. Motortechnische Zeitschrift 59, 6/1998, S. 378 – 383.

HITZLER, G.; U. ESSERS (1997): Ermittlung von PKW-Emissionsfaktoren für Benzol und Partikel im Ballungsraum. Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-PEF 160, 1997.

KERSTEN, I. (1995): Untersuchung der Emissionen aus öl- und gasbefeueerten Kleinfeuerungsanlagen, IVD Universität Stuttgart, 1995.

KLEIN, N.; K. HOFFMANN (1995): Modultechnik in der Fertigung von Katalysatoren. ATZ/MTZ - Motortechnische Zeitschrift (Sonderheft Fertigungstechnik, S. 10 - 13), 1994/95.

KÖNIG, A.; J. COOKE (1996). Auswirkungen von Kraftstoffreformulierungen auf das Emissionsverhalten moderner Kraftfahrzeuge mit geregelterm Drei-Wege-Katalysator. 17. Internationales Wiener Motoren Symposium, 25.-26.10.1996.

KOSTKA, J.; O. GRAUPNER (1996): Auswirkungen von Kraftstoffreformulierungen auf das Emissionsverhalten moderner Kraftfahrzeuge mit geregelterm Drei-Wege-Katalysator. Volkswagen AG Wolfsburg, Deutsche Shell AG Hamburg, VDI, 17. Internationales Wiener Motoren Symposium, 25.-26.10.1996.

LAURIKKO, J.; P. AAKKO (1995): The effect of ambient temperature on the emissions of some Nitrogen Compounds: A comparative study on Low-, Medium- and High-mileage Three-way Catalyst Vehicles, SAE –Paper, No. 950933, 1995.

MANN, J. (1997): Entstehung von  $N_2O$  im Abgas und der Einfluß reformulierter Kraftstoffe auf die Abgaszusammensetzung bei Fahrzeugen mit Katalysator. IVK, Universität Stuttgart, 1997.

MÖWV (1998): Aus der Sprache des Öls. Mineralölwirtschaftsverband e.V., 11. Auflage, Hamburg, 1998.

MOUSSIOPOULOUS, N. (1992): Kraftfahrzeugemissionen und Ozonbildung. Springer Verlag, Berlin, 1992.

NIERHAUVE, B. (1996): Erfüllung der Motorischen Anforderungen an Kraftstoffe. ARAL – Forschung, Vortrag im Rahmen des Lehrgangs: Kraftstoffe und ihre Anwendung in Otto- und Dieselmotoren. Technischen Akademie Esslingen am 14.11.1996, Bochum, 1996.

OTTER, G. et al. (1993): Effect of Gasoline Reformulation on Exhaust Emissions in Current European Vehicles. Shell Research Ltd., SAE-Paper No. 930372, 1993.

PRIGENT, M.; G. DE SOETE (1989): Nitrous Oxide  $N_2O$  in Engines Exhaust Gases. A First Appraisal of Catalyst Impact. Society of Automotive Engineers Inc, SAE-Paper No. 890492, 1989.

BOSCH-1 (1999): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Robert Bosch GmbH, 23. Auflage, Stuttgart, 1999.

BOSCH-2 (1997): Abgastechnik für Ottomotoren. Robert Bosch GmbH, Technische Unterrichtung, 4. veränderte Ausgabe, Stuttgart, 1997.

SHELEF, M.; K. OTTO (1968): Appearance of  $N_2O$  in the Catalytic Reduction of NO by CO. Journal of Catalysis 10, S. 408 – 412, 1968.

SJÖDIN, A.; D. COOPER; K. ANDREASSON (1995): Estimations of Real-World N<sub>2</sub>O Emissions from Road Vehicles by Means of Measurements in a Traffic Tunnel. Journal of the Air & Waste Management Association 45, 3/1995, S. 186 – 190.

TVG (1993): N<sub>2</sub>O in der Umwelt. VGB Kraftwerkstechnik 73, Heft 2, 1993.

UMWELT (1998): Ein Jahr emissionsbezogene Kraftfahrzeugsteuer. Zeitschrift Umwelt 9/1998, S. 424 f.

UBA-1 (1994): Auswirkungen einer veränderten Benzinzusammensetzung in Europa. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt und Reaktorsicherheit – Luftreinhaltung-. Forschungsbericht 104 08 507. UBA-FB 94-028. Berlin, 1994.

BASSHUYSEN, R. van; F. SCHÄFER (Hrsg.)(1997): Shell Lexikon Verbrennungsmotor. Ein Supplement der ATZ und MTZ – Folge 20, Heft 1, 1997.

WEHINGER, C. (1994): Die Bildung der Sekundäremission Distickstoffoxid bei der katalytischen Schadstoffminderung. Dissertation, TU München, 1994.

WEISWEILER, W. et al. (1996): N<sub>2</sub>O - Entfernung bei der edelmetallkatalysierten NO<sub>x</sub> – Reduktion aus sauerstoffhaltigen Motorabgasen. 12. Statuskolloquium des PEF, Forschungszentrum Karlsruhe, S. 394 - 405, 1996.

## **World Wide Web (WWW)**

ARAL (1999): ARAL AG; <http://www.aral.de/>

CARB (1999): California Air Resources Board (CARB) (Hrsg.): Cleaner Burning Gasoline, Fact Sheets published by the CARB and the Phase 2 Reformulated Gasoline Public Education Subcommittee. <http://www.arb.ca.gov/homepage.htm>

CEC (1999): California Energie Commission; <http://www.energy.ca.gov>

DKRZ (1999): Deutsches Klimarechenzentrum, <http://www.dkrz.de/index.html>

EPA-1 (1999): Environmental Protection Agency; <http://www.epa.gov/>

EPA-2 (1999): Environmental Protection Agency;  
<http://www.epa.gov/orcdizux/rfgorig.htm>

## Literaturverzeichnis

EU-2 (1999): Europäische Union ; <http://www.europa.eu.int/>

EUROPIA (1999): <http://www.europia.com/>

EVS (1999): EVS AG; <http://www.evs.de/>

GSF (1999): <http://www.gsf.de/>

LUA (1999): Landesumweltamt NRW: <http://www.lua.nrw.de/>

OFA (1999): Oxigenated Fuels Association (Hrsg.): The Supply & Cost of Alternatives to MTBE in Gasoline. Statement of the OFA, 1998. <http://www.ofa.net/ofacec.htm>

UBA-2 (1999): Umweltbundesamt; <http://www.umweltbundesamt.de>

## Anhang A: Kraftstoffzusammensetzung

Tabelle 1: Typische Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe in Ottokraftstoffen (Quelle: Aral)

Kohlenwasserstoff	C- Zahl	Massenanteil in % *)			
		Normal (bleifrei)	Super (bleifrei)	Super Plus (bleifrei)	Super (verbleit)
<b>Summe Alkane (Parafine)</b>		<b>50 - 65</b>	<b>40 - 60</b>	<b>35 - 55</b>	<b>40 - 60</b>
Propan	3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
i-Butan / n-Butan	4	4,2	4,7	4,8	3,0
i-Pentan / n-Pentan	5	2,8	12,0	18,3	22,5
i-Hexan / n-Hexan	6	11,3	12,8	11,2	10,9
i-Heptan / n-Heptan	7	2,2	5,8	5,2	4,2
i-Oktan / n-Oktan	8	35,8	15,8	2,1	1,7
Nonane	9	1,2	1,0	0,7	0,9
Decane	10	0,1	0,1	---	0,1
<b>Summe Alkene (Olefine)</b>		<b>0 - 35</b>	<b>0 - 25</b>	<b>0 - 5</b>	<b>0 - 15</b>
Butene	4	2,5	0,4	0,1	0,9
Pentene	5	3,1	0,1	0,2	1,9
Hexene	6	4,8	0,3	0,1	0,6
Heptene	7	1,2	0,2	0,3	0,3
Oktene	8	1,0	< 0,1	0,2	0,1
Nonene	9	2,0	0,7	0,4	0,1
Decene	10	1,0	0,7	0,2	0,1
<b>Summe Aromaten</b>		<b>23 - 35</b>	<b>35 - 55</b>	<b>38 - 55</b>	<b>38 - 55</b>
Benzol	6	2,2	2,8	2,6	3,0
Toluol	7	4,4	15,1	7,9	8,3
Xylol	8	5,1	13,3	11,1	10,9
Ethylbenzol	8	1,8	1,5	3,1	2,2
C9-Aromaten	9	10,2	8,5	18,3	20,5
C10-Aromaten	10	3,1	0,2	5,0	0,8
Naphtalin	10	< 0,1	< 0,1	0,2	0,4

\* Daten sind Richtwerte, da die Zusammensetzung der Kraftstoffe in Abhängigkeit von Rohölen / Raffinerieausstattung schwankt. Zusätzlich können die Kraftstoffe sauerstoffhaltige Verbindungen enthalten (Alkohole / Ether)

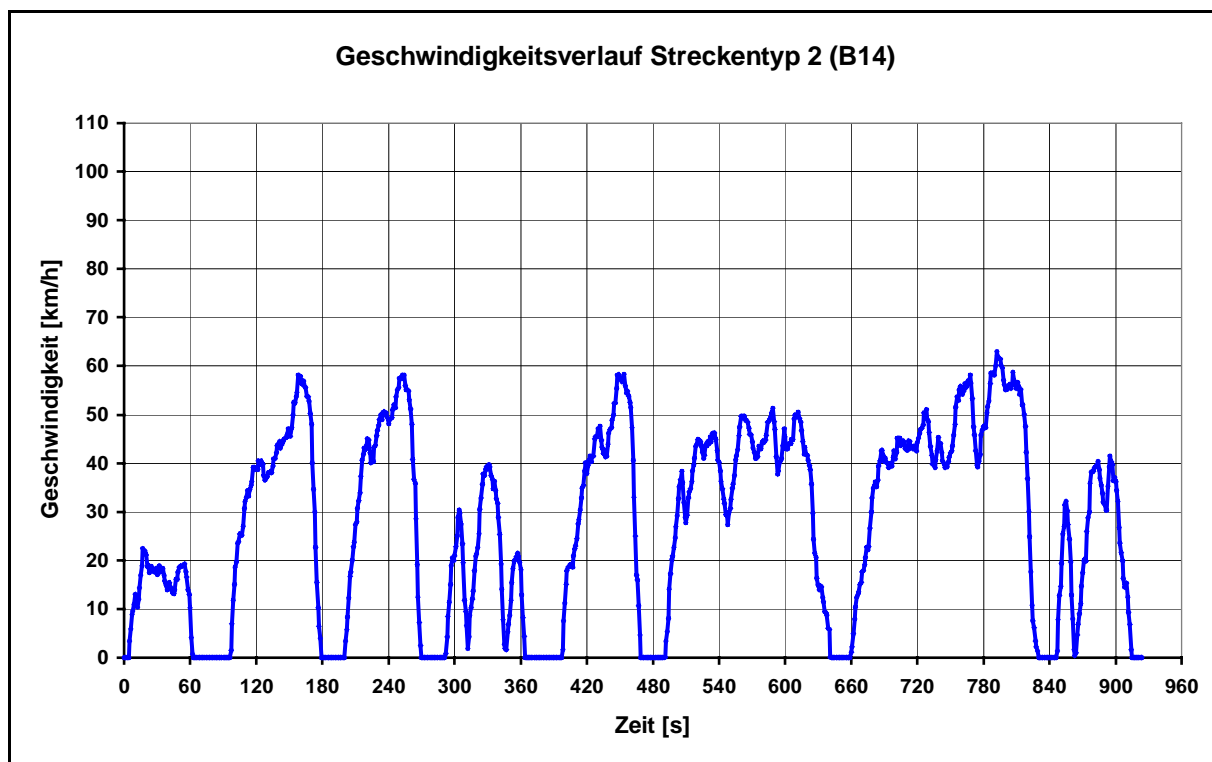
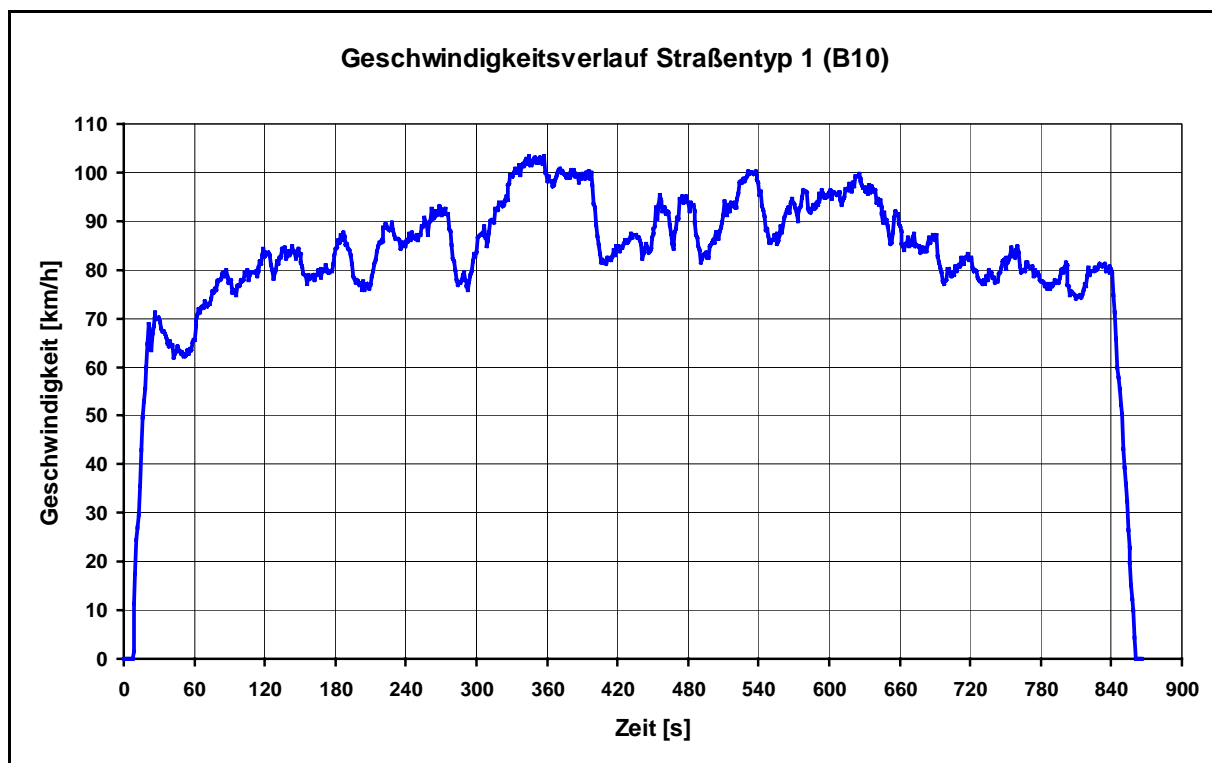


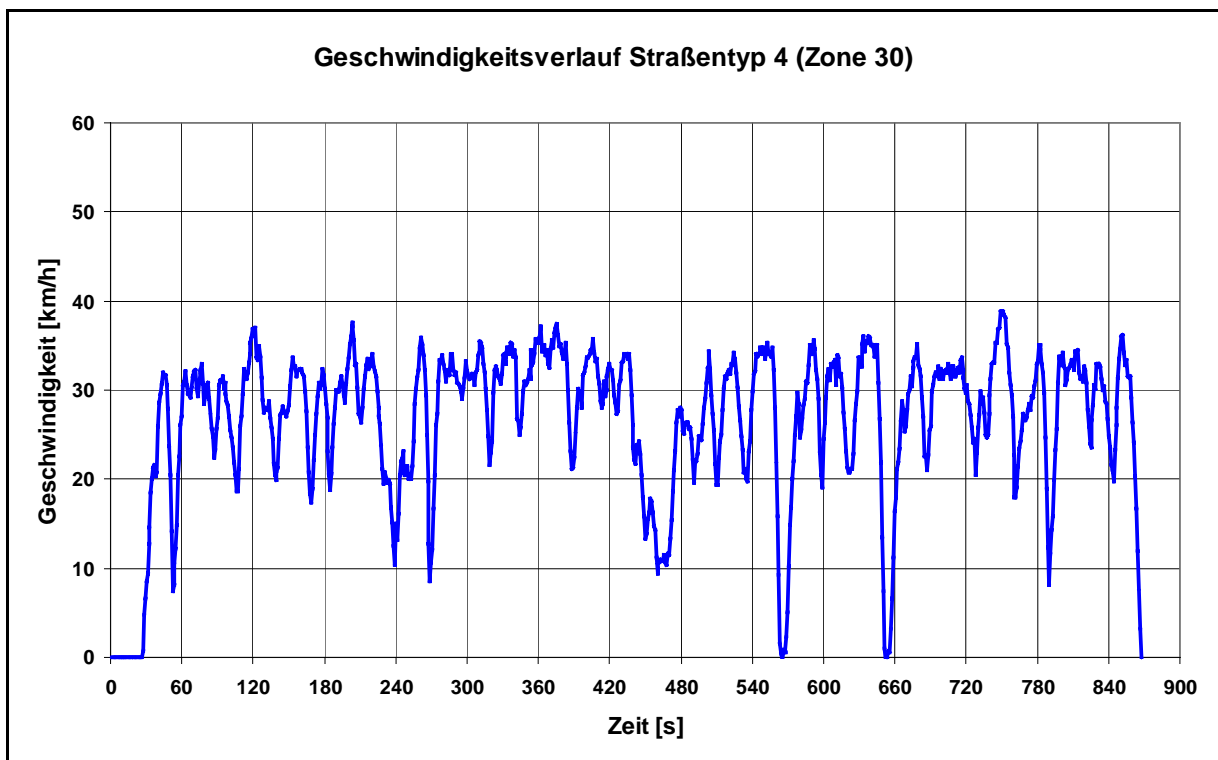
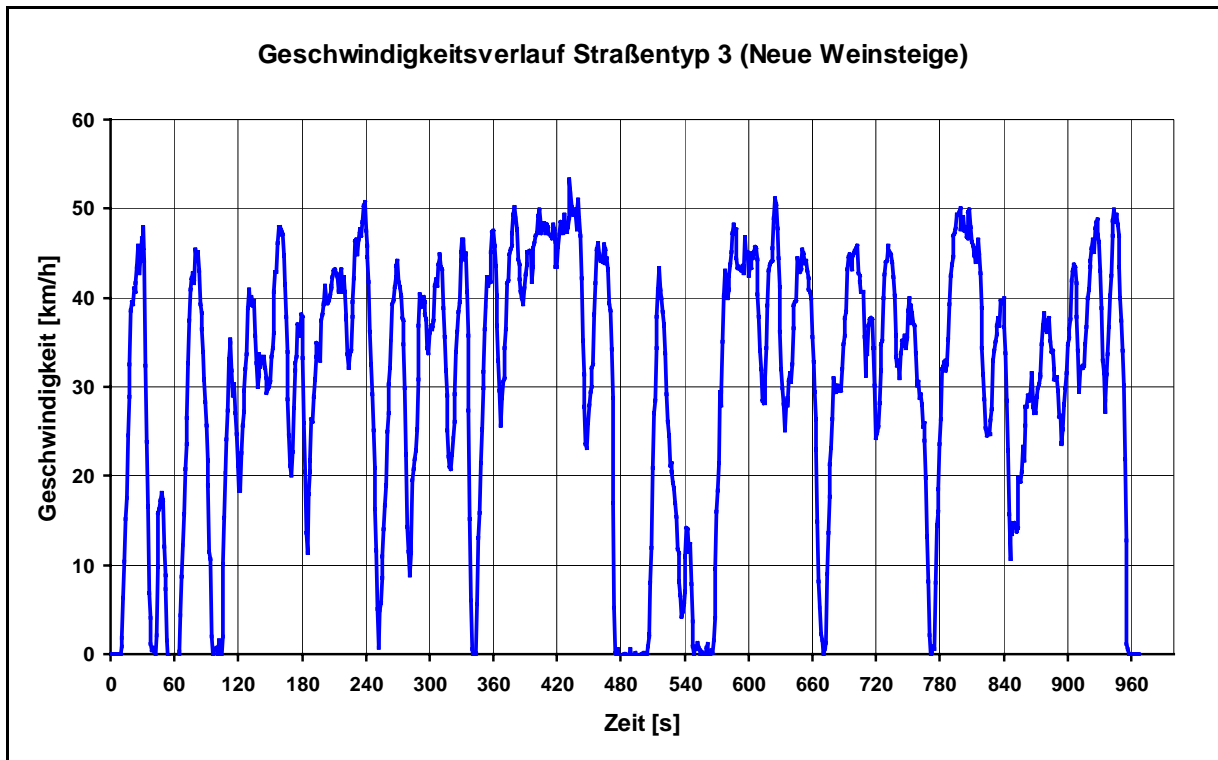
Tabelle 2: Analysen der Reformulierten Kraftstoffe

	Method	Unit	Standard	Phase 2	RK 1	RK 2	
<b>(RON+MON)/2</b>	ASTM D 2699-86 + ASTM D 2700-86			96,9	96,7	92,9	(ROZ + MOZ)/2
<b>Sensitivity</b>	ASTM D 2699-86 / ASTM D 2700-86			10,6	11,2	9,3	
<b>Density at 15 °C</b>	ASTM D 4052	kg/m <sup>3</sup>		736,5	769,6	734,2	Dichte bei 15°C
<b>RVP</b>	ASTM D 323	bar		0,48	0,5	0,48	Dampfdruck nach Reid
<b>Distillation</b>	ASTM D 86						Siedeverlauf
<b>I.B.P</b>		°C		39	36	37	
<b>10 % v/v</b>		°C		61	52	57	T10
<b>50 % v/v</b>		°C		96	94	95	T50
<b>90 % v/v</b>		°C		145	154	140	T90
<b>F.B.P</b>		°C		183	189	190	
<b>Residue</b>		% v/v		1	1	1	Rückstand
<b>Aromatics</b>	ASTM D 1319	% v/v		23,7	44	24,7	Aromaten
<b>Olefins</b>	ASTM D 1319	% v/v		5,8	6,7	4,4	Olefine
<b>Saturates</b>	ASTM D 1319	% v/v			49,3	70,9	Paraffine
<b>Benzene</b>	ASTM D 5580	% v/v		1	<0,1	<0,1	Benzol
<b>Multi-Substitued- Alkyl-Aromatics</b>	GC-Analyse	% v/v		13	21,3	14,4	
<b>MTBE</b>	ASTM D 4815	% v/v		11,2	13,7	< 0,1	MTBE
<b>Oxidation Stability</b>	ASTM D 525			> 1050	> 1200	> 1200	Oxidationsstabilisator
<b>Existent Gum</b>	ASTM D 381	mg/100 ml		1,2	< 1	< 1	Abdampfdruckstand
<b>Copper Corrosion</b>	ASTM D 130			1a	1a	1a	Kupferkorrosion
<b>Lead</b>	ASTM D 3237	g/l		< 0,0025	< 0,0025	< 0,0025	Blei
<b>Phosphorous</b>	ASTM D 3231	g/l		< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	Phosphor
<b>Sulfur Content</b>	ISO 4260	mg/kg		31	35	38	Schwefel
<b>Net Heating Value</b>	DIN 51900-03	MJ/kg		42,11	42	43,1	Heizwert
<b>Hydrogen</b>	Elementary Analysis	% w/w		13,68	11,7	13,8	Wasserstoff
<b>Carbon</b>	Elementary Analysis	% w/w		84,28	86,5	86,3	Kohlenstoff

Quelle: Analysezertifikate Firma Haltermann

Anhang B: Geschwindigkeitsverläufe der realen Straßentypen (Teil 1)





## Geschwindigkeitsverlauf ECE-EUDC Zyklus

