



## **Untersuchungsbericht**

### **NOx-Emissionsverhalten von Pkw mit verschiedenen Kraftstoffen**

#### **Diesel – Autogas – Benzin**

Erstellt von:

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Heinze**

**und**

**Daniel Arndt, B.Eng.**

im Auftrag des Deutschen Verbandes Flüssiggas e. V.

**Januar 2016**

Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes

Institut Automotive Powertrain

Prof. Dr.-Ing. Thomas Heinze

Goebenstr. 40

D-66117 Saarbrücken

**Inhaltsverzeichnis**

I. Abbildungen .....III

1 Projekt-/Aufgabenbeschreibung.....1

2 Versuchsfahrzeuge.....1

3 Messtechnik .....1

4 Abgasmessungen.....4

5 Auswertung .....5

6 Ergebnisse des NOx-Emissionsvergleichs von Pkw bei Betrieb mit verschiedenen Kraftstoffen.....6

    6.1 Kennfelder .....6

    6.2 Konsolidierung der Kennfeldmessungen auf repräsentative Bereiche für NEFZ und RDE.....8

7 Zusammenfassung.....11

II. Anhang..... XII

## I. Abbildungen

Abbildung 1: Auspuffrohr mit Messsonde und Breitbandlambdasonde .....	3
Abbildung 2: Aufbau Abgasmesstechnik.....	3
Abbildung 3: Messfahrt auf dem Rollenprüfstand .....	4
Abbildung 4: Diagramm mit 34 Messpunkten (Matrix) (Beispiel: Messung Astra 1.4T LPG) ...	4
Abbildung 5: Methode zur Auswertung nach ISO 8178-1:2006(E).....	5
Abbildung 6: NO <sub>x</sub> -Emissionskennfeld Astra 1.4 Turbo [mg/kWh].....	6
Abbildung 7: NO <sub>x</sub> -Emissionskennfeld Astra 1.4 Turbo LPG [mg/kWh] .....	7
Abbildung 8: NO <sub>x</sub> -Emissionskennfeld Astra 1.6 CDTi [mg/kWh].....	7
Abbildung 9: Diagramm NEFZ-Betriebspunkte .....	8
Abbildung 10: Diagramm RDE-Betriebspunkte .....	9
Abbildung 11: Diagramm absolute NO <sub>x</sub> -Emissionen .....	10
Abbildung 12: Diagramm NO <sub>x</sub> -Emissionen relativ zum Dieselfahrzeug .....	10
Abbildung 13: NO <sub>x</sub> -Konzentration [ppm] Astra 1.6 CDTi .....	XII
Abbildung 14: NO <sub>x</sub> -Konzentration [ppm] Astra 1.4 Turbo LPG .....	XIII
Abbildung 15: NO <sub>x</sub> -Konzentration [ppm] Astra 1.4 Turbo .....	XIV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsfahrzeuge ..... 1

## 1 Projekt-/Aufgabenbeschreibung

Zu den limitierten Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen gehören Stickoxide, Partikel, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe. Stickoxide werden als besonders kritisch betrachtet, da diese zusammen mit Wasser Salpetersäure bilden können. Dies führt a) zu kritischen Reizungen in den Atemwegen und b) zur Entstehung von saurem Regen. Ferner tragen Stickoxide gemeinsam mit Kohlenwasserstoffen in der Atmosphäre zur Bildung von Ozon und anderen Photooxidantien bei, und damit auch zur Bildung des photochemischen Smogs.

Die Stickoxide sind in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus geraten, da sich trotz der ständigen Verschärfung der gesetzlichen Grenzwerte die Luftschadstoffgehalte, insbesondere die Schadstoffkonzentrationen von NO<sub>2</sub>, in Städten nicht reduziert haben. Ganz offensichtlich greifen die bisherigen gesetzlichen Regelungen nicht ausreichend.

Vor diesem Hintergrund sollen vergleichende NO<sub>x</sub>-Messungen an gleichartigen Fahrzeugen mit den drei verschiedenen Kraftstoffen Diesel, Benzin E5 und Autogas vorgenommen werden. Hierbei sollen insbesondere auch Unterschiede zwischen dem Betrieb im Homologationszyklus „NEFZ“ und anderen möglichen Betriebsarten herausgearbeitet werden, wie sie im realen Straßenbetrieb auftreten können.

## 2 Versuchsfahrzeuge

Als Versuchsfahrzeuge kommen drei gleichartige Opel Astra Modelle zum Einsatz, die die gleiche Größe und ähnliche Leistung haben, aber jeweils mit den Kraftstoffen Diesel, Benzin oder Autogas betrieben werden.

Tabelle 1: Versuchsfahrzeuge

Kraftstoff	Diesel	Benzin	Autogas
Fahrzeug	Opel Astra J 1.6 CDTi	Opel Astra J 1.4 Turbo	Opel Astra J 1.4 Turbo
Motor	B16DTH	A14NET	A14NET
Leistung	100 kW	103 kW	103 kW
Drehmoment	320 Nm	200 Nm	200 Nm
Abgasnorm	Euro 6	Euro 5	Euro 5

## 3 Messtechnik

Als Abgasmesstechnik kommen ein NO<sub>x</sub>-Chemilumineszenz-Detektor CLD 822 M der Firma ECO PHYSICS und ein 5-Gasetester Maha MGT5 zum Einsatz, der parallel zum CLD die Gase HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO erfasst. Das CLD 822 M misst ausschließlich die Stickoxide NO

und NO<sub>2</sub>, aus denen sich NO<sub>x</sub> zusammensetzt. Mit einer Breitbandlambdasonde wird zusätzlich das Abgaslambda ermittelt.

Technische Daten ECO PHYSICS CLD 822 M	
Messverfahren	Chemilumineszenz
Messbare Gase:	NO, NO <sub>2</sub>
Messbereich Messbereich NO	0 – 5000 ppm

Technische Daten Maha MGT 5	
Messverfahren	Infrarot (CO, CO <sub>2</sub> ) / Elektrochemisch (NO, O <sub>2</sub> )
Messbare Gase:	HC, CO; CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO
Messbereich Messbereich CO	0 – 15 % Vol.
Messbereich Messbereich O <sub>2</sub>	0 – 25 % Vol.
Messbereich Messbereich CO <sub>2</sub>	0 – 20 % Vol.
Messbereich Messbereich NO	0 – 5000 ppm
Messwertauflösung Messwertauflösung CO	0,001 %
Messwertauflösung Messwertauflösung CO <sub>2</sub>	0,01 %
Messwertauflösung Messwertauflösung O <sub>2</sub>	0,01 %
Messwertauflösung Messwertauflösung NO	1 ppm
Genauigkeitsklasse	PTB: Klasse 1 / OIML Klasse 0

Das zu messende Abgas gelangt durch eine Sonde, die im Abgasendrohr angebracht wird, über einen Wasserabscheider zu den Gasanalysatoren (Abb. 2). Vor dem CLD ist zusätzlich ein Messgaskondensator zwischengeschaltet, damit das Abgas trocken gemessen werden kann.



Abbildung 1: Auspuffrohr mit Messsonde und Breitbandlambdasonde



Abbildung 2: Aufbau Abgasmesstechnik

## 4 Abgasmessungen

Die Abgasmessungen erfolgen auf einem Maha LPS 2000 Rollenprüfstand (Abb.1). Auf diesem Prüfstand werden für jeden Kraftstoff Lastpunkte abgefahren, die gleichmäßig verteilt das gesamte mögliche Betriebskennfeld des Fahrzeugs abdecken (Abb.2). Damit sind die NEFZ-Betriebspunkte als Teilmenge in der Menge aller Prüfpunkte eingeschlossen. Die Abgasemissionen sowie OBD- und Leistungsdaten aus dem Prüflauf werden digital aufgezeichnet. Zusätzlich werden die Fahrzeuge im NEFZ auf dem Rollenprüfstand sowie auf der Straße im Real Driving Emissions-Betrieb (RDE) gefahren.



Abbildung 3: Messfahrt auf dem Rollenprüfstand

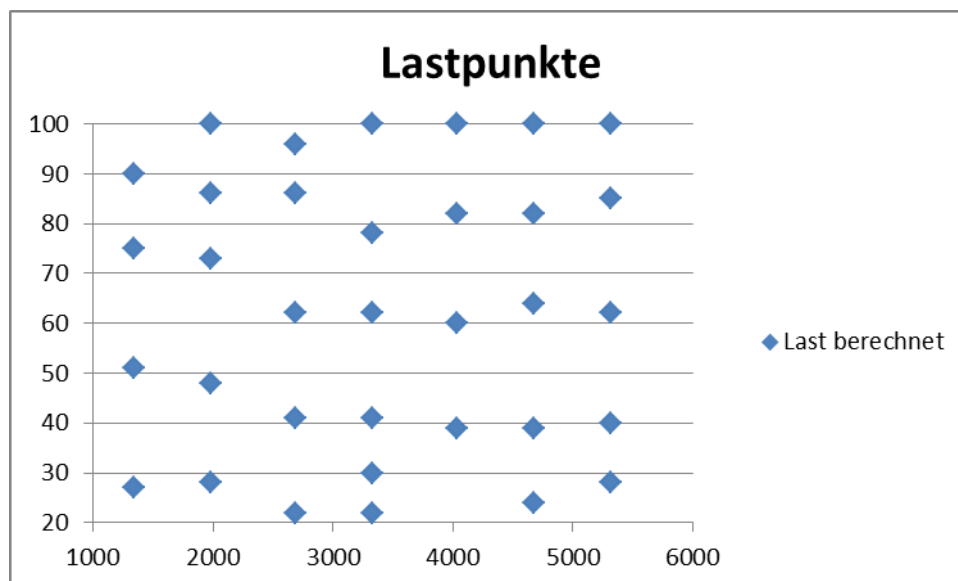


Abbildung 4: Diagramm mit 34 Messpunkten (Matrix) (Beispiel: Messung Astra 1.4T LPG)



## 5 Auswertung

Die Auswertung der Emissionen erfolgt nach ISO 8178-1:2006(E) über die Carbon Balance Methode. Dabei wird mit Hilfe aller Randbedingungen das trocken gemessene Abgas korrigiert, um auf die realen feuchten Abgase rückschließen zu können.

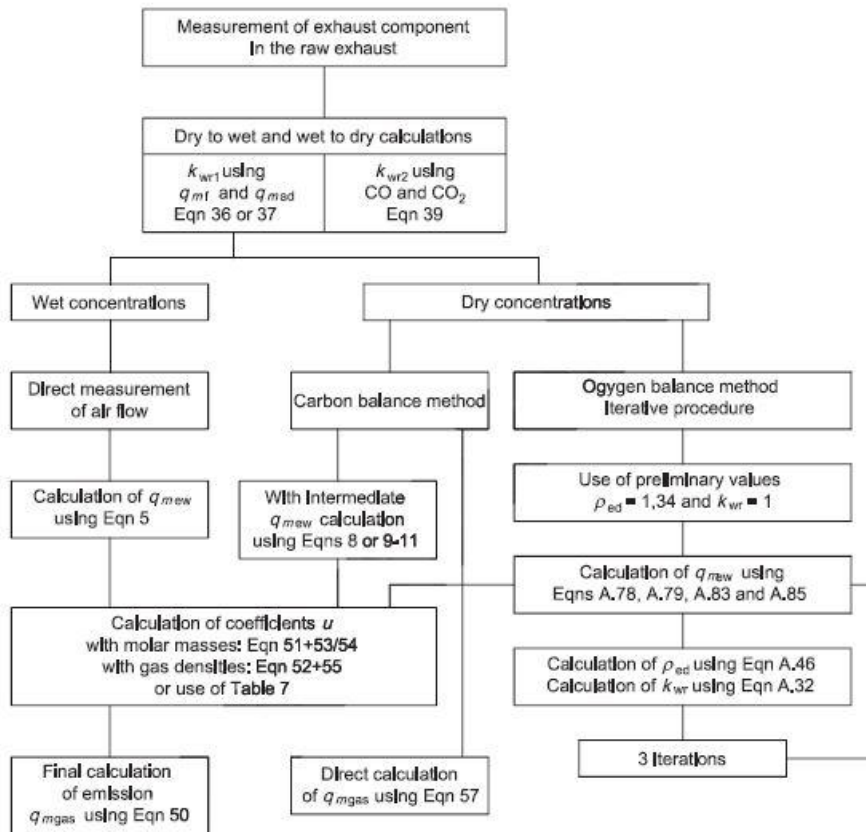


Abbildung 5: Methode zur Auswertung nach ISO 8178-1:2006(E)

## 6 Ergebnisse des NOx-Emissionsvergleichs von Pkw bei Betrieb mit verschiedenen Kraftstoffen

### 6.1 Kennfelder

Das Emissionsverhalten eines Fahrzeugs hängt stark von den jeweiligen Betriebspunkten ab. Bei betriebswarmem Fahrzeug sind die Betriebspunkte im Wesentlichen über die Parameter Motordrehzahl und die Lastanforderung (Gaspedalstellung) definiert. Zur übersichtlichen Darstellung der Vielzahl von Messergebnissen wird eine Art Kartendarstellung gewählt, die sogenannte Kennfelddarstellung, bei der ähnlich wie bei den Höhenlinien auf einer Landkarte die Höhe der Emissionen über Linien und/oder Farben mit bestimmter Wertigkeit dargestellt werden. Die Betriebspunkte des Fahrzeugs werden über die „Koordinaten“ Drehzahl und Last dargestellt. Das Ergebnis ist eine Art Fingerabdruck des jeweiligen Fahrzeugs, aus dem die Fahrzeugemissionen unter allen motorisch möglichen Drehzahl- und Lastzuständen abgelesen werden können.

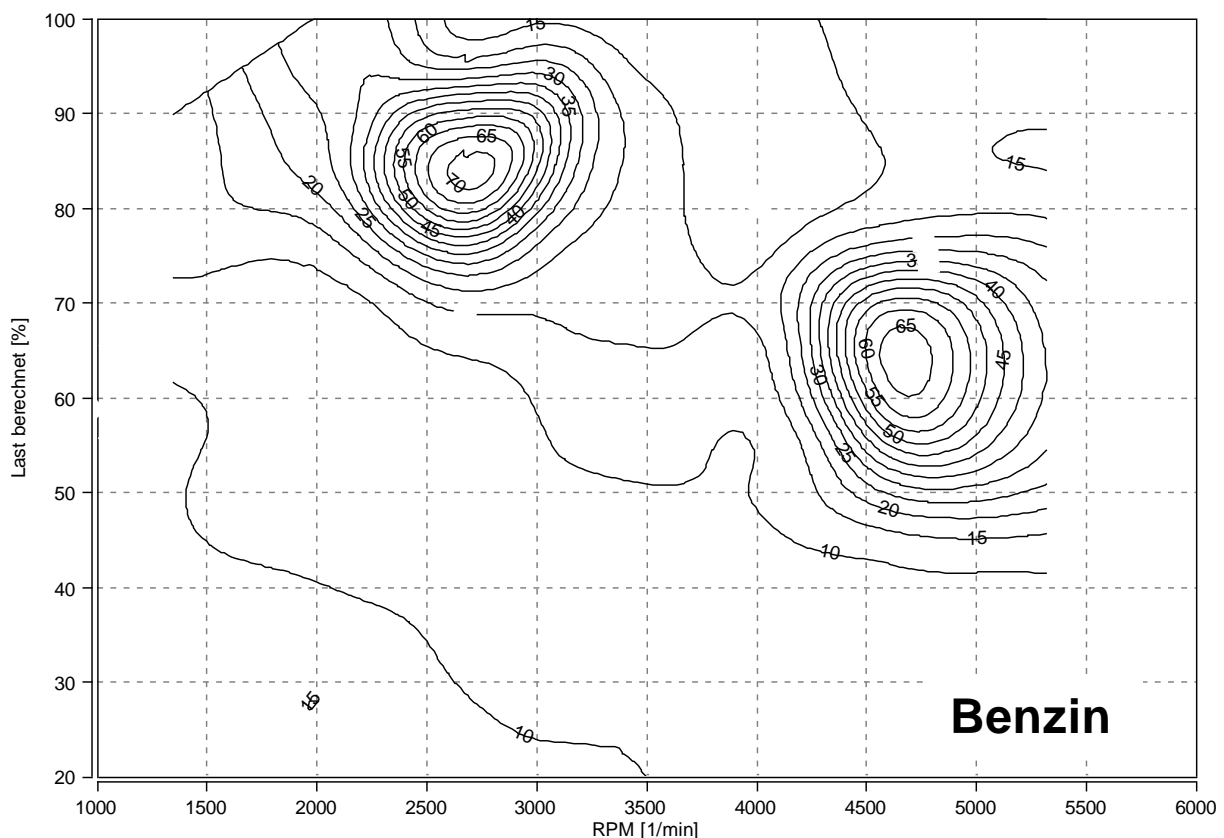


Abbildung 6: NOx-Emissionskennfeld Astra 1.4 Turbo [mg/kWh]

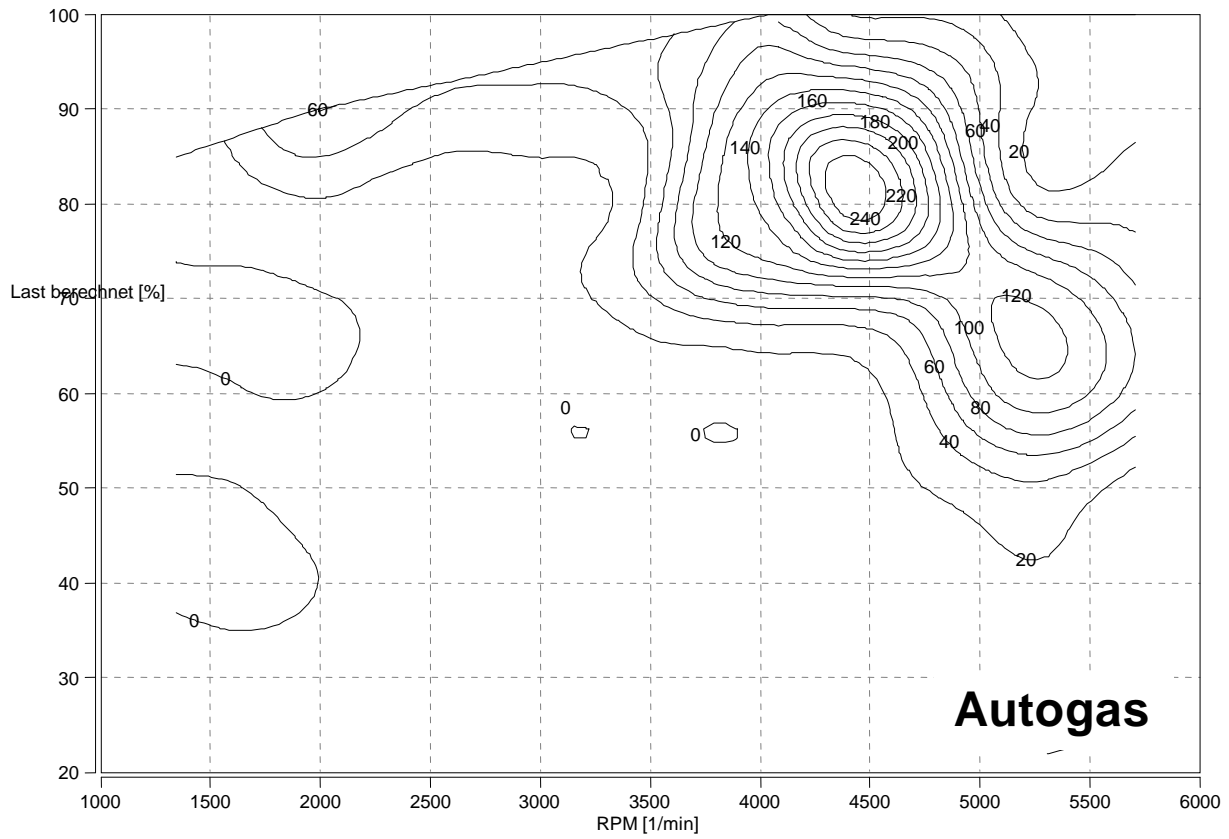


Abbildung 7: NOx-Emissionskennfeld Astra 1.4 Turbo LPG [mg/kWh]

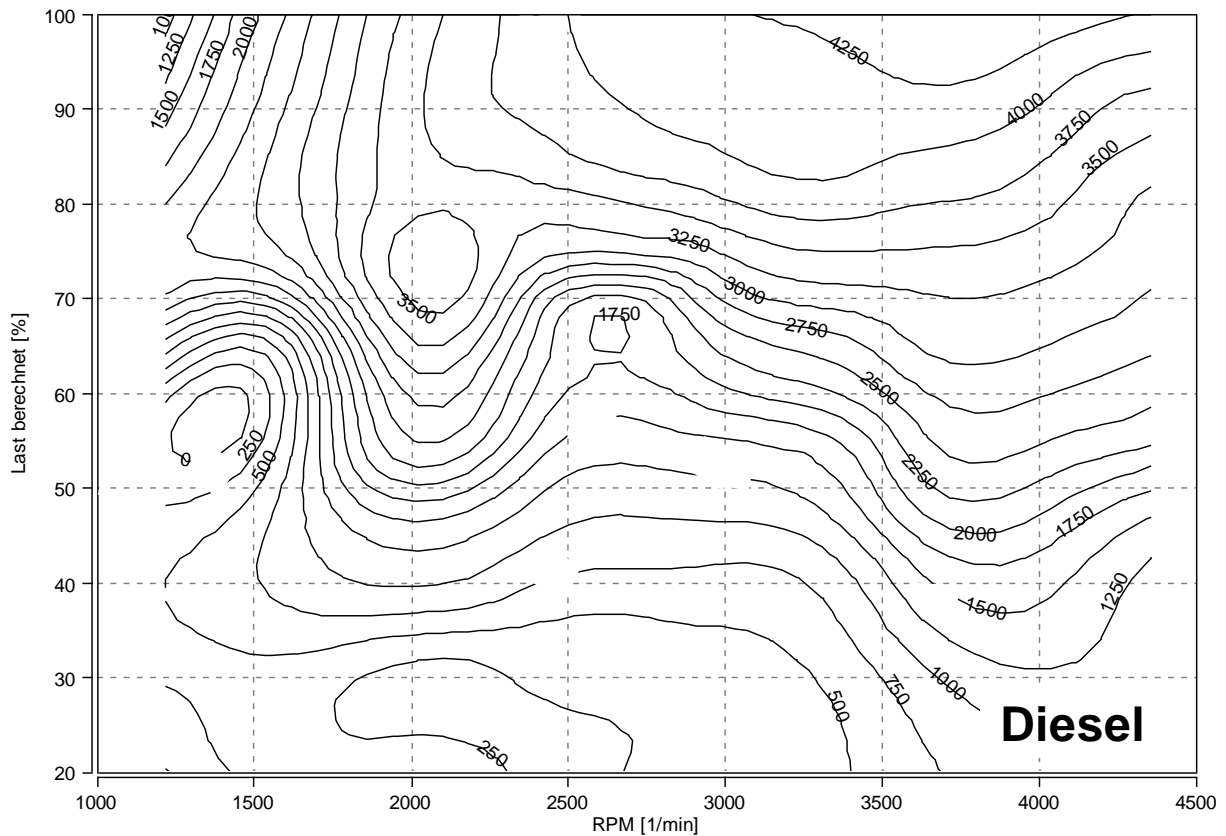


Abbildung 8: NOx-Emissionskennfeld Astra 1.6 CDTi [mg/kWh]

## 6.2 Konsolidierung der Kennfeldmessungen auf repräsentative Bereiche für NEFZ und RDE

Anhand der NEFZ-Fahrten auf der Leistungsrolle und der RDE-Fahrten auf der Straße wurden abgegrenzte Teilbereiche der Kennfelder identifiziert, die sich a) relativ einfach eingrenzen lassen und mit Hilfe derer sich b) für den jeweiligen Betriebsfall (NEFZ oder RDE) die Messdaten aus den Kennfeldmessungen möglichst gut und repräsentativ konsolidieren lassen.

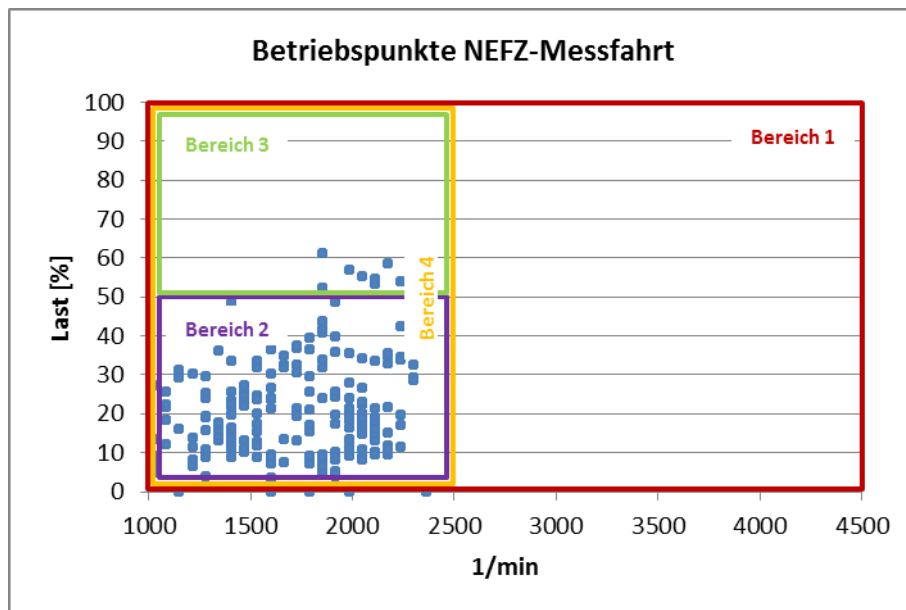


Abbildung 9: Diagramm NEFZ-Betriebspunkte

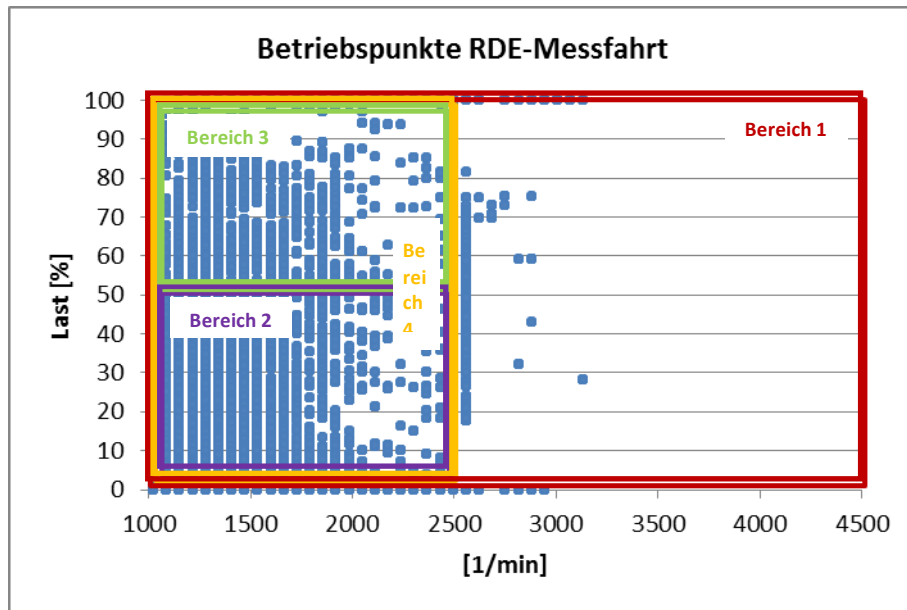


Abbildung 10: Diagramm RDE-Betriebspunkte

Bereich 1: gesamtes Kennfeld

Bereich 2: 0-50 % Last 1000-2500 1/min: repräsentativ für NEFZ

Bereich 3: 50-100% Last 1000-2500 1/min: repräsentativ für NEFZ-Überschreitungen

Bereich 4: 0-100% Last 1000-2500 1/min repräsentativ für RDE-Fahrten

Dem entsprechend wird das Emissionskennfeld in vier Bereiche unterteilt und gemittelt. Mit dem Ergebnis wird die Vielzahl der gemessenen Einzelpunkte zusammengefasst, um für die unterschiedlichen Kraftstoffe konsolidierte Werte zu erhalten.

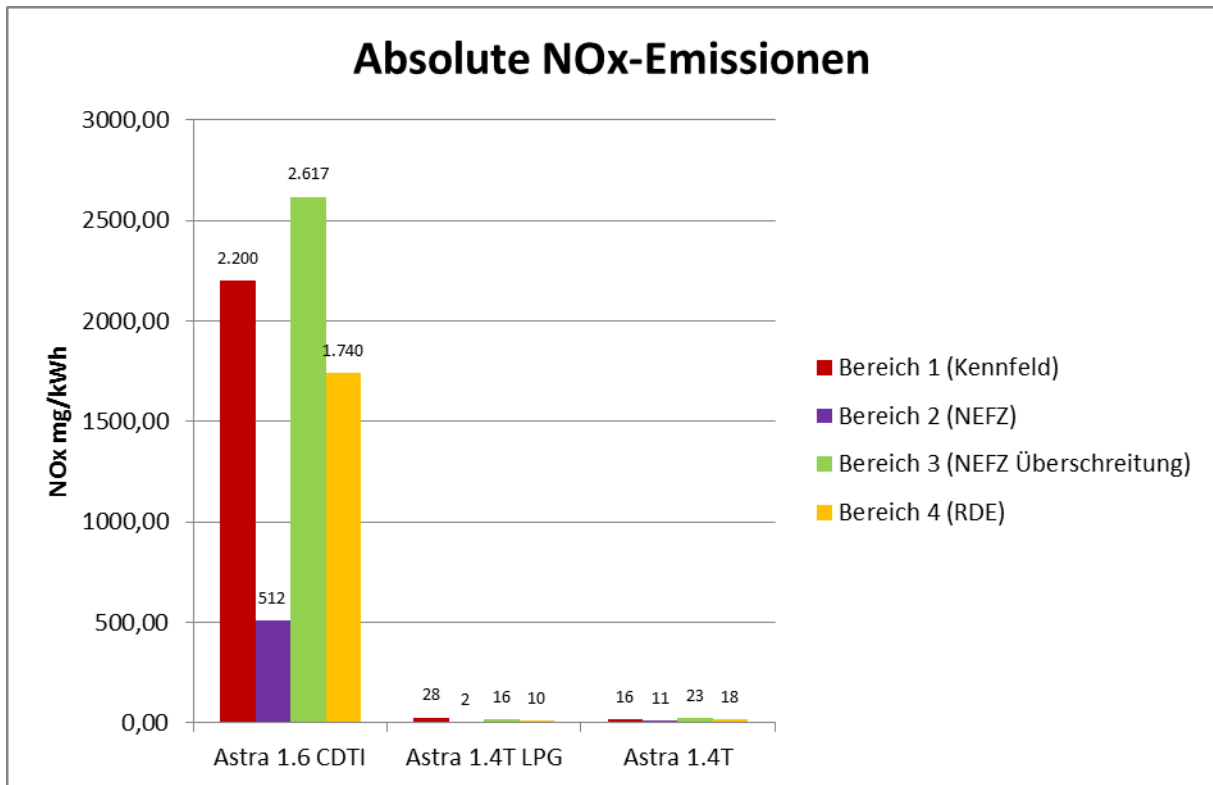


Abbildung 11: Diagramm absolute NOx-Emissionen

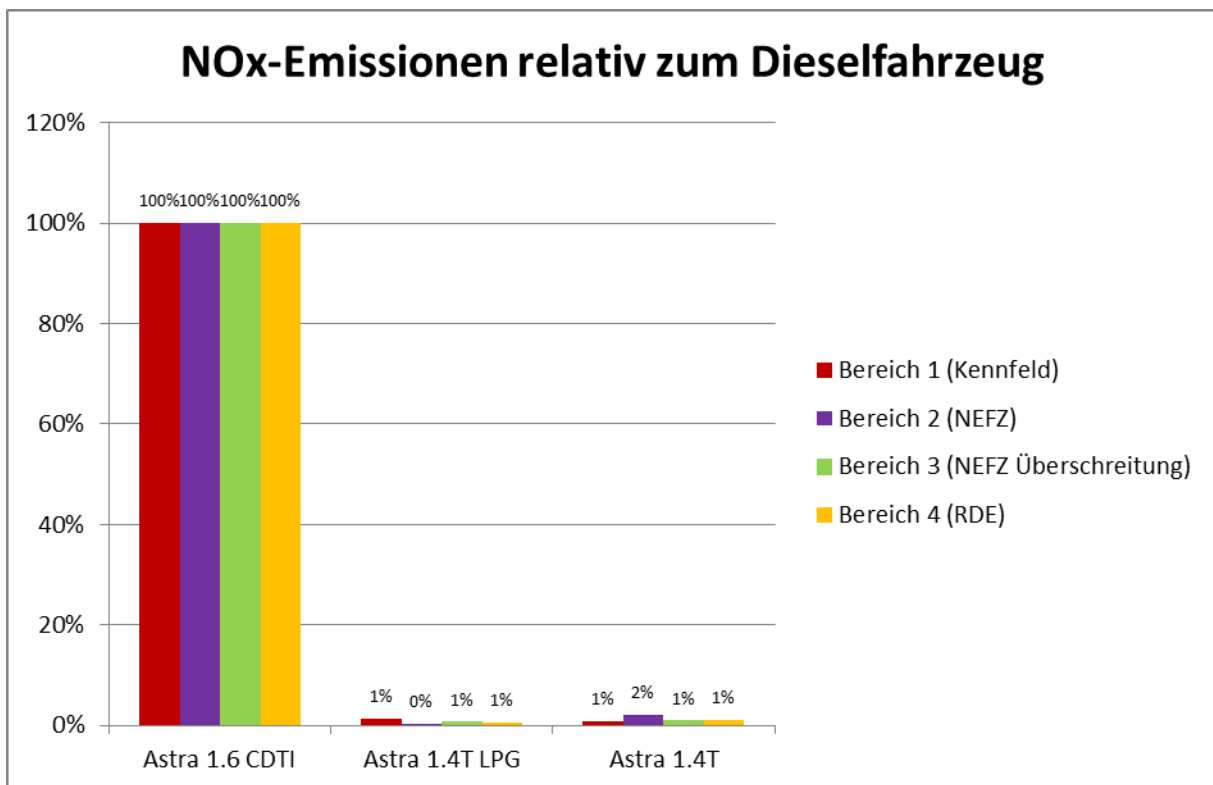


Abbildung 12: Diagramm NOx-Emissionen relativ zum Dieselfahrzeug

## 7 Zusammenfassung

Für eine Untersuchung der NO<sub>x</sub>-Emissionen von Pkw bei Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffen wurden gleichartige serienmäßig ausgestattete Fahrzeuge der Modelreihe Opel Astra mit Autogas, Benzin und Diesel auf einem Rollenprüfstand vergleichend vermessen.

Die Fahrzeuge wurden jeweils im gesamten Drehzahl-/Lastkennfeld vermessen, um einen vollständigen Überblick über die NO<sub>x</sub>-Emissionsraten bei allen motorisch möglichen Betriebspunkten zu gewinnen. Diese Vorgehensweise erlaubt insbesondere Betrachtungen, die über die gesetzlich vorgeschriebenen Testbereiche bzw. Fahrzyklen hinausgehen.

Die Auswertung der Messungen zeigt:

- Die geringsten NO<sub>x</sub>-Emissionen werden bei allen Kraftstoffen bei Betriebspunkten erzielt, die im Betriebsbereich des gesetzlich vorgeschriebenen NEFZ liegen. Außerhalb des NEFZ steigen die NO<sub>x</sub>-Emissionen ca. um den Faktor 2 bis 5 oder auch höher an, falls das Fahrzeug im NEFZ besonders gut abgeschnitten hat.
- Die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Dieselfahrzeugs sind weitgehend unabhängig vom Betriebsbereich um mehr als das Hundertfache höher als die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Autogas- und des Benzinfahrzeugs.
- Autogas- und Benzinfahrzeug liegen bedingt durch die gleichartige ottomotorische Verbrennung und Abgasreinigung mit Drei-Wege-Kat auf einem sehr niedrigen, ähnlichen NO<sub>x</sub>-Emissionsniveau.
- Testsieger ist im Betriebsbereich des NEFZ mit 2 mg NO<sub>x</sub>/kWh und im Betriebsbereich des RDE mit 10 mg NO<sub>x</sub>/kWh das Autogasfahrzeug, gefolgt vom Benzinfahrzeug mit 11 mg NO<sub>x</sub>/kWh im NEFZ-Bereich und 18 mg NO<sub>x</sub>/kWh im RDE-Bereich. Das Dieselfahrzeug liegt in denselben Bereichen bei 512 bzw. 1740 mg NO<sub>x</sub>/kWh.

II. Anhang

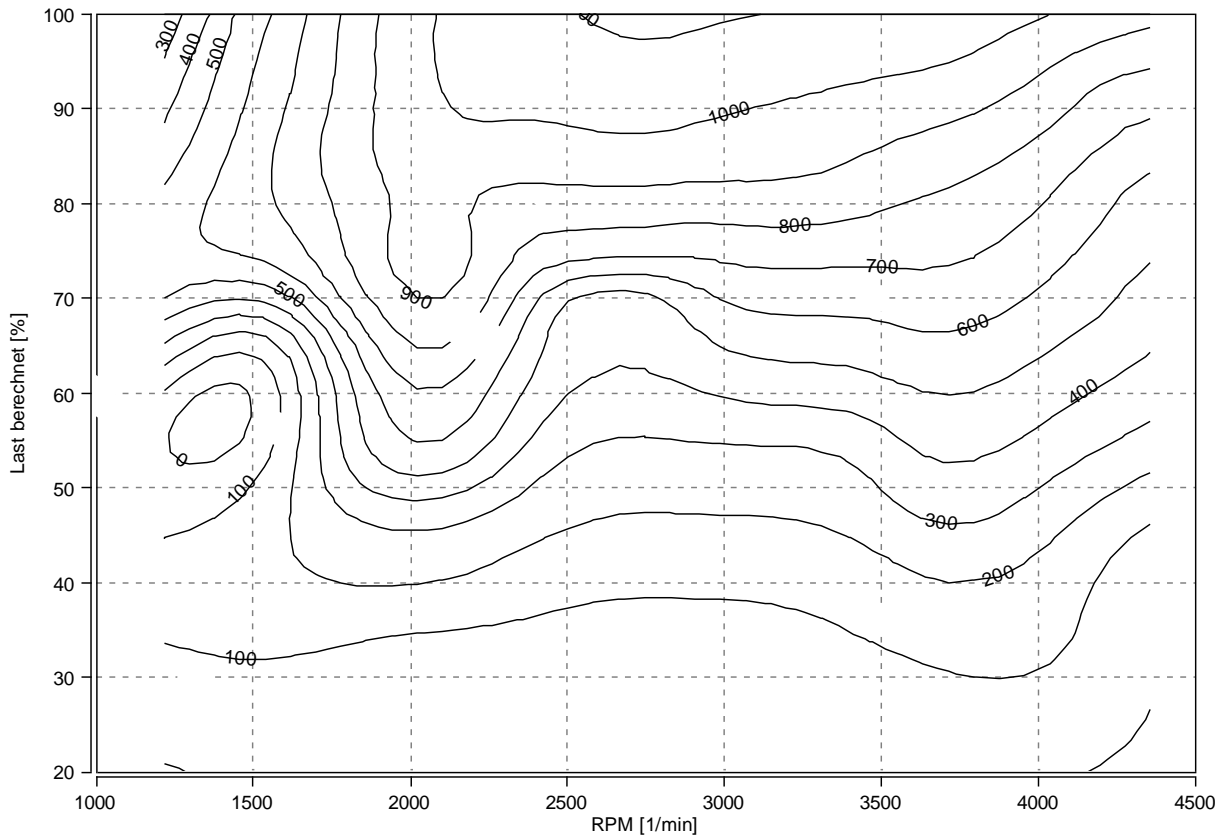


Abbildung 13: NOx-Konzentration [ppm] Astra 1.6 CDTi



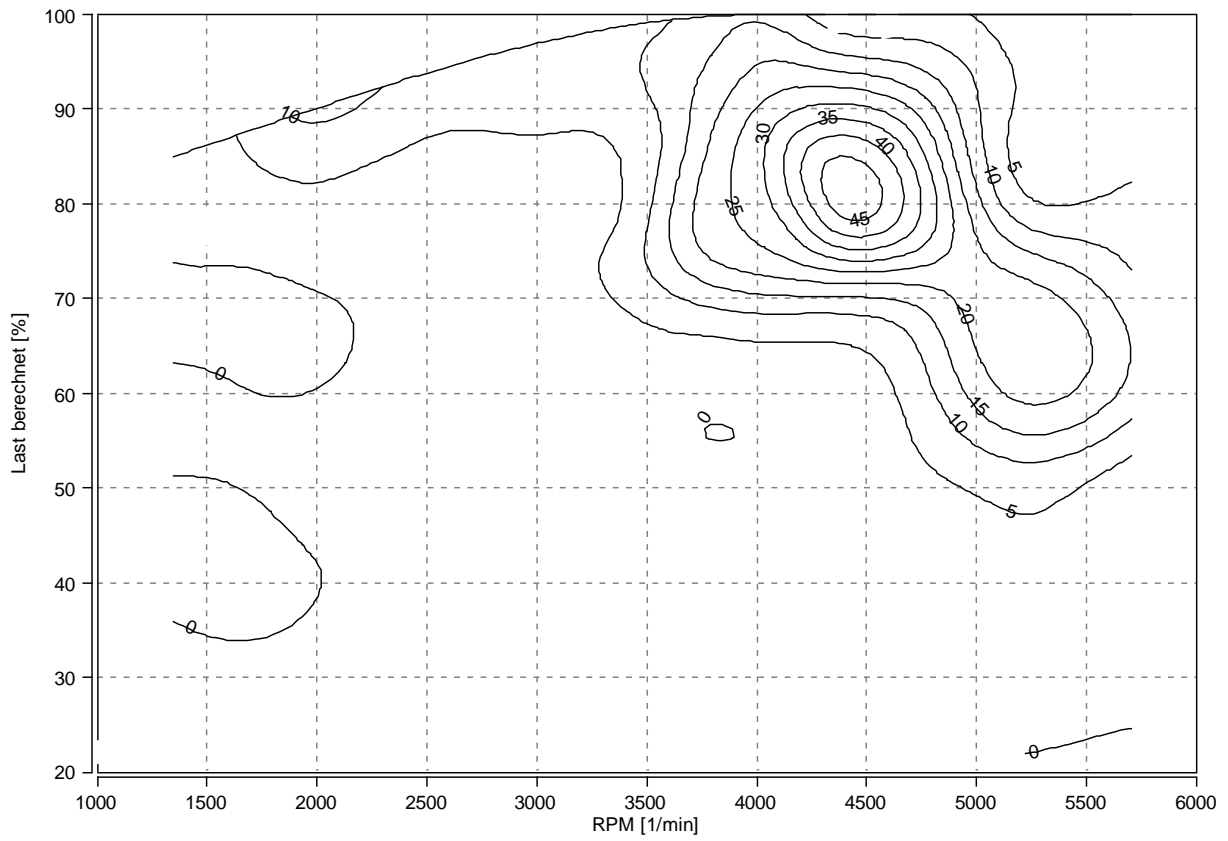


Abbildung 14: NOx-Konzentration [ppm] Astra 1.4 Turbo LPG

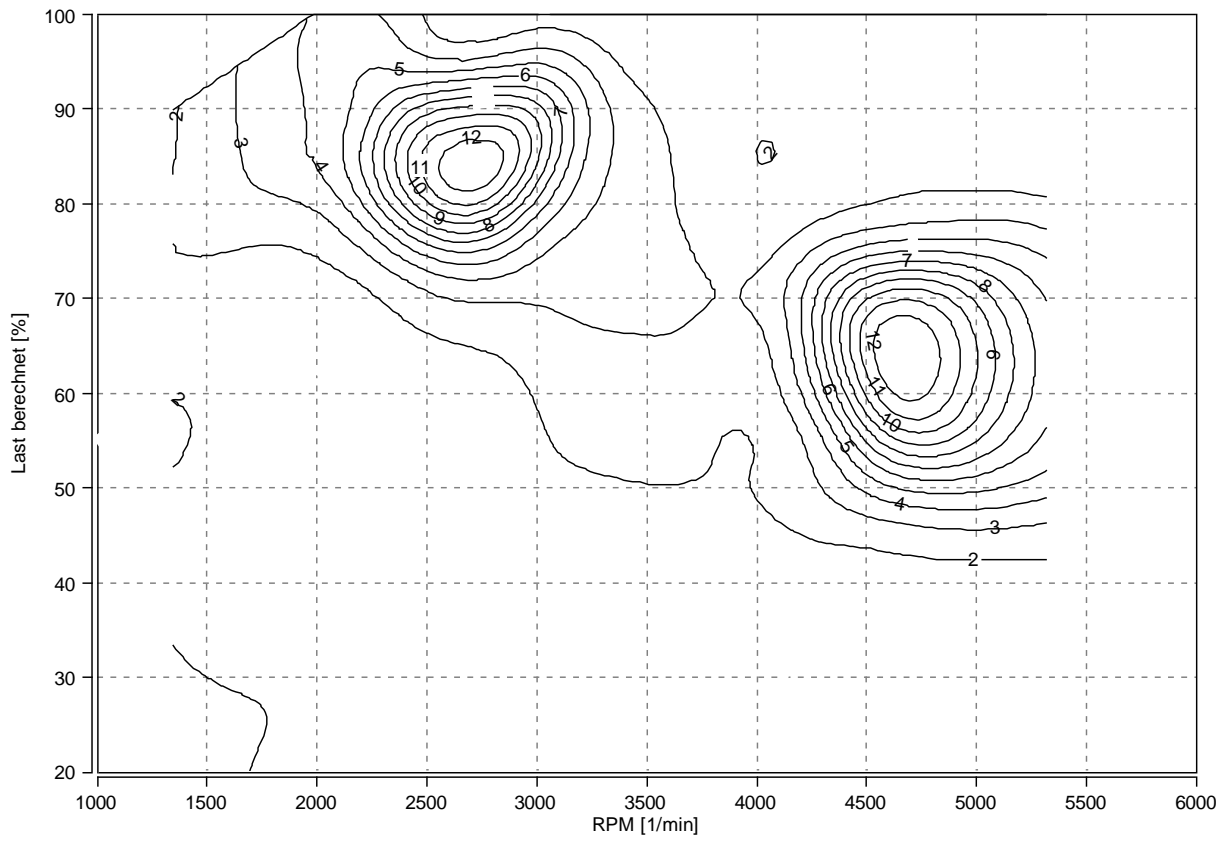


Abbildung 15: NOx-Konzentration [ppm] Astra 1.4 Turbo