



*Berlin: lebenswerter*

# Ermittlung der Emissionen von Kraftfahrzeugen im fließenden Verkehr mit Remote Sensing Detection (Emi-RSD) Schlussbericht

**Auftraggeber**

Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz  
Referat Immissionsschutz  
Brückenstraße 6  
10179 Berlin  
[www.berlin.de/sen/uvk/](http://www.berlin.de/sen/uvk/)

**Auftragnehmer**

Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG  
Friedrichstraße 24  
01067 Dresden

**Bildnachweise**

Titelbild: Aufgebaute Messanlage; Foto: Firma OPUS  
Abbildung 2-1, 2-2: OPUS RSE; Figure 8-1 bis 8-10: OPUS RSE

Januar 2021

Dieser Bericht wurde im Auftrag der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (SenUVK) erstellt. Für die Inhalte zeichnet das Auftrag nehmende Unternehmen verantwortlich. Die SenUVK macht sich die Positionen nicht automatisch zu eigen. Sie übernimmt keinerlei Gewähr für die Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit oder Qualität der bereitgestellten Informationen.

## Schlussbericht

# ERMITTLUNG DER EMISSIONEN VON KRAFTFAHRZEUGEN IM FLIEßENDEN VERKEHR MIT REMOTE SENSING DETECTION (EMI-RSD)

Dipl.-Ing. W. Schmidt

Dr. rer. nat. I. Düring

unter Mitarbeit von OPUS RSE (Spanien / Madrid) und

Dr. Jens Borken-Kleefeld (Österreich / Wien)

Juli 2020  
Projekt 71678-17-10**Auftraggeber:**Senatsverwaltung  
für Umwelt, Verkehr  
und Klimaschutz  
Referat Immissionsschutz  
Brückenstraße 6  
10179 Berlin**Gefördert durch**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen BundestagesDie Durchführung dieser  
Untersuchung erfolgte im  
Rahmen der Förderrichtlinie  
„Digitalisierung kommunaler  
Verkehrssysteme“

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>VORGEHENSWEISE</b> .....	<b>7</b>
2.1	Durchführung der Messung mit Remote Sensing Detection (RSD).....	7
2.2	Auswertung der Kennzeichen und Vergleich mit RSD-Messungen.....	13
2.2.1	Kennzeichenauswertung .....	13
2.2.2	Auswertung der Emissionen.....	14
<b>3</b>	<b>AUSWERTUNG</b> .....	<b>17</b>
3.1	Deskriptive Statistik der Kennzeichenauswertung und fahrzeugspezifische Messdatenzuordnung .....	17
3.2	Vergleich emissionskonzeptspezifischer Emissionsfaktoren mit Typzulassungsgrenzwerten.....	24
3.3	Vergleich fahrzeugspezifischer PKW-Emissionsfaktoren mit Emissionsfaktoren nach HBEFA .....	28
3.3.1	Emissionsfaktoren in PHEM .....	28
3.3.2	Emissionsfaktoren aus RSD-Messungen .....	37
3.3.3	Vergleich PKW-NO <sub>x</sub> -Emissionen PHEM / RSD .....	44
3.4	NO <sub>2</sub> / NO <sub>x</sub> – Verhältnis .....	55
3.5	Identifizierung von Fahrzeugen mit möglicherweise defizitärer Abgasreinigung („High Emitter“) .....	60
3.5.1	Benzin-Pkw.....	61
3.5.2	Diesel-Pkw.....	62
3.5.3	Schwere Nutzfahrzeuge und Busse .....	64
3.5.4	Einordnung .....	67
<b>4</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>68</b>
<b>5</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>72</b>
<b>A N H A N G</b>	<b>A1: BESCHREIBUNG OPUS-MESSSYSTEM</b> .....	<b>73</b>

---

<b>A N H A N G A2: VERGLEICH: RSD-MESSUNG / GRENZWERT TYPZULASSUNG FÜR ALLE REGLEMENTIERTEN SCHADSTOFFE .....</b>	<b>81</b>
<b>A N H A N G A3: SIMULATION OF FUEL FLOW FROM VEHICLE SPEED AND ACCELERATION DATA .....</b>	<b>104</b>

**Hinweise:**

Vorliegender Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin nicht, auch nicht auszugsweise, vervielfältigt werden.

Die Tabellen und Abbildungen sind kapitelweise durchnummeriert.

Literaturstellen sind im Text durch Name und Jahreszahl zitiert. Im Kapitel Literatur findet sich dann die genaue Angabe der Literaturstelle.

Es werden Dezimalpunkte (= wissenschaftliche Darstellung) verwendet, keine Dezimalkommas. Eine Abtrennung von Tausendern erfolgt durch Leerzeichen.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Installation des OPUS RSD5000 (© OPUS RSE).....	8
Abb. 2-2: Schematische Darstellung des OPUS RSD5000-Systems (© OPUS RSE).....	8
Abb. 3-1: PKW-Flottenzusammensetzung nach Antriebsart .....	22
Abb. 3-2: PKW-Flottenzusammensetzung Benzin/ Diesel nach Euro-Norm .....	23
Abb. 3-3: Vergleich NO <sub>x</sub> : RSD-Messung / Grenzwert Typzulassung PKW Benzin .....	26
Abb. 3-4: Vergleich NO <sub>x</sub> : RSD-Messung / Grenzwert Typzulassung PKW Diesel .....	27
Abb. 3-5: Emissionsverlauf NO <sub>x</sub> - exemplarisch PKW-Diesel-Euro-6c.....	30
Abb. 3-6: HBEFA-PKW-Innerortsfahrzyklen: Häufigkeiten der Betriebszustände (Leistung/ Sekunde) nach PKW-Emissionskonzept.....	31
Abb. 3-7: NO <sub>x</sub> in g/km: PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) nach Motorleistung P: PKW-Benzin Euro 3 bis Euro 5 .....	32
Abb. 3-8: NO <sub>x</sub> in g/km: PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) nach Motorleistung P: PKW-Benzin Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP .....	33
Abb. 3-9: NO <sub>x</sub> in g/km: PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) nach Motorleistung P: PKW-Diesel Euro 3 bis Euro 5 .....	34
Abb. 3-10: NO <sub>x</sub> in g/km: PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) nach Motorleistung P: PKW-Diesel Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP .....	35
Abb. 3-11: Mittelwerte NO <sub>x</sub> in g/km: PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) nach Motorleistung P PKW- Diesel (oben) und Benzin (unten).....	36
Abb. 3-12: RSD-Messung: Häufigkeiten der Betriebszustände (Leistung/Sekunde) aller validen NO <sub>x</sub> -Messwerte nach PKW-Emissionskonzept. Von 0 bis 20 kW in Stufen von 1 kW, darüber hinaus in Stufen von 5 kW. ....	38
Abb. 3-13: NO <sub>x</sub> in g/km: valide RSD-Messwerte nach Motorleistung P: PKW-Benzin Euro 3 bis Euro 5 .....	39
Abb. 3-14: NO <sub>x</sub> in g/km: valide RSD-Messwerte nach Motorleistung P: PKW-Benzin Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP .....	40
Abb. 3-15: NO <sub>x</sub> in g/km: valide RSD-Messwerte nach Motorleistung P: PKW-Diesel Euro 3 bis Euro 5 .....	41
Abb. 3-16: NO <sub>x</sub> in g/km: valide RSD-Messwerte nach Motorleistung P: PKW-Diesel Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP .....	42
Abb. 3-17: Mittelwerte NO <sub>x</sub> in g/km: RSD-Messung nach Motorleistung P: PKW-Diesel (oben) und Benzin (unten) .....	43
Abb. 3-18: Funktion zur Berücksichtigung des Einflusses Umgebungstemperatur auf die Höhe der Stickoxid-Emissionsfaktoren der Diesel-PKW Euro 3 bis Euro 6 .....	44
Abb. 3-19: Temperaturverteilung valide PKW-NO <sub>x</sub> -Messungen .....	45

Abb. 3-20: Mittelwerte NO <sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) mit RSD-Messung: PKW-Benzin Euro 3 bis Euro 5 .....	47
Abb. 3-21: Mittelwerte NO <sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) mit RSD-Messung: PKW-Benzin Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP .....	48
Abb. 3-22: Mittelwerte NO <sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) mit RSD-Messung: PKW-Diesel Euro 3 bis Euro 5 .....	49
Abb. 3-23: Mittelwerte NO <sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) mit RSD-Messung: PKW-Diesel Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP .....	50
Abb. 3-24: HBEFA-PKW-Innerortsfahrzyklen: Häufigkeiten der PKW-Betriebszustände .....	51
Abb. 3-25: Mittelwerte NO <sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) mit RSD-Messung .	52
Abb. 3-26: Emissionsseitige Berücksichtigung des Laufleistungseinflusses in HBEFA 4.1 .....	53
Abb. 3-27: Mittelwerte NO <sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) - inkl. Laufleistungseinfluss - mit RSD-Messung (temperaturkorrigiert), Emissionen gewichtet nach Leistungsverteilung HBEFA 4.1- Innerortszyklen .....	54
Abb. 3-36: Vergleich der NO <sub>2</sub> -Anteile RSD-Messung (Primärdatensatz) / HBEFA 4.1 .....	57
Abb. 3-37: Vergleich der NO <sub>2</sub> -Anteile RSD-Messung (nachjustierter Primärdatensatz) / HBEFA 4.1 .....	58
Abb. 3-38: Vergleich NO <sub>2</sub> -Verhältnis Messung / HBEFA 4.1 nach Emissionskonzept.....	59

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Durchführungszeitraum der RSD-Messungen .....	7
Tab. 2-2: Messgenauigkeit des OPUS RSD5000.....	11
Tab. 3-1: Datenrücklauf der Kennzeichenerfassung .....	18
Tab. 3-2: Anzahl aller erfassten Messwerte Bus, LNF und PKW nach Messgerät und Standort..	19
Tab. 3-3: Anzahl aller erfassten Messwerte SNF und Zweirad nach Messgerät und Standort.....	20
Tab. 3-4: Anzahl aller validen Messwerte – Antrieb Benzin oder Diesel - Bus, LNF und PKW ....	21
Tab. 3-5: Anzahl aller validen Messwerte – Antrieb Benzin oder Diesel - SNF.....	22
Tab. 3-6: Innerortsverkehrssituationen nach HBEFA 4.1 .....	29
Tab. 3-7: Koeffizienten der Funktionen zur Berechnung der Korrekturfaktoren .....	45
Tab. 3-9: Charakteristik der untersuchten Stichprobe: Anzahl der individuellen Pkw je Schicht, durchschnittliche Motorlast und Emissionsrate. ....	61
Tab. 3-10: Charakteristik der auffälligen Benzin-Pkw, die mindestens siebenmal vermessen wurden: Anzahl der individuellen Pkw je Schicht, durchschnittliche Motorlast und Emissionsrate. ....	62
Tab. 3-11: Charakteristik der auffälligen Diesel-Pkw, die mindestens sieben Mal vermessen wurden: Anzahl der individuellen Pkw je Schicht, durchschnittliche Motorlast und Emissionsrate. ....	63
Tab. 3-12: Charakteristik der Diesel-Pkw mit besonders niedrigen NO <sub>x</sub> Emissionen, die mindestens siebenmal vermessen wurden: Anzahl der individuellen Pkw je Schicht, durchschnittliche Motorlast und Emissionsrate. ....	64
Tab. 3-13: Übersicht der RSD Messwerte für N <sub>3</sub> Fahrzeuge (SNF): Zahl der Messwerte (brutto und vollgültig), VSP und NO <sub>x</sub> Werte.....	65
Tab. 3-14: Übersicht der RSD Messwerte für einzelne, mehrfach gültig vermessene N <sub>3</sub> Fahrzeuge (SNF): Zahl der Messwerte (brutto und vollgültig), VSP und NO <sub>x</sub> Werte.....	65
Tab. 3-15: Übersicht der RSD Messwerte für Busse (M <sub>3</sub> ): Zahl der Messwerte (brutto und vollgültig), VSP und NO <sub>x</sub> Werte .....	66
Tab. 3-16: Übersicht der RSD Messwerte für einzelne, mehrfach gültig vermessene N <sub>3</sub> Fahrzeuge (SNF): Zahl der Messwerte (brutto und vollgültig), VSP und NO <sub>x</sub> Werte.....	66



## 1 AUFGABENSTELLUNG

Mit dem Verfahren der „Remote Sensing Detection“ (RSD) soll direkt die Abgasemission von vorbeifahrenden Fahrzeugen gemessen und mit Angaben aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) und aus der Typgenehmigung verglichen werden.

Außerdem soll untersucht werden, ob mit RSD der Anteil von sogenannten „High-Emittern“ bestimmt werden kann, d.h. von Fahrzeugen, die aufgrund technischer Defekte oder Abgas-Manipulationen an Stickoxidminderungssystemen (z. B. durch „AdBlue-Blocker“) stark erhöhte Realemissionen aufweisen.

Das Projekt „Ermittlung der Emissionen von Kraftfahrzeugen im fließenden Verkehr mit Remote Sensing Detection (Emi-RSD)“ verfolgt damit folgende Ziele:

1. Bestimmung der Realemissionen von Kraftfahrzeugen im fließenden Verkehr
2. Bestimmung von Emissionsfaktoren und Vergleich mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA)
3. Vergleich von Realemissionen mit Emissionsgrenzwerten der Typgenehmigung
4. Identifizierung von „High-Emittern“ im Straßenverkehr

Es handelt sich um die ersten RSD-Messungen für einen öffentlichen Auftraggeber in Deutschland.

Das Vorhaben umfasst zwei Lose und dementsprechend zwei Arbeitspakete (AP):

Inhalt und Ziel des **AP1** ist die **Messung** der spezifischen Emissionen von Fahrzeugen im realen Straßenverkehr durch das Verfahren „Remote Sensing Detection“ und die Erfassung der Kennzeichen der zugehörigen Fahrzeuge. Als Ergebnis soll für jedes Fahrzeug die Emission der Luftschadstoffe NO, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, Summe HC und optional von Partikeln in g/km für die momentane Verkehrssituation der Messung vorliegen.

Inhalt und Ziel des **AP2** ist die **Auswertung** der Kennzeichen sowie der RSD-Messdaten. Die Auswertung der RSD-Messdaten soll dabei vor allem einen Vergleich bzgl. der formalen Abgasstandards sowie der Emissionsfaktoren nach HBEFA umfassen.

## 2 VORGEHENSWEISE

### 2.1 Durchführung der Messung mit Remote Sensing Detection (RSD)

Die Remote-Sensing (RS)-Messungen wurden in Berlin durchgeführt an den Standorten

- Sonnenallee stadteinwärts zwischen Mareschstraße und Thiemannstraße (Longitude: 13.451491°, Latitude: 52.476156°) sowie
- Am Seegraben stadtauswärts am Abzweig zur A 117 (Longitude: 13.556603°, Latitude: 52.405692°)

in den in **Tab. 2-1** dargestellten Zeiträumen durchgeführt.

**Tab. 2-1: Durchführungszeitraum der RSD-Messungen**

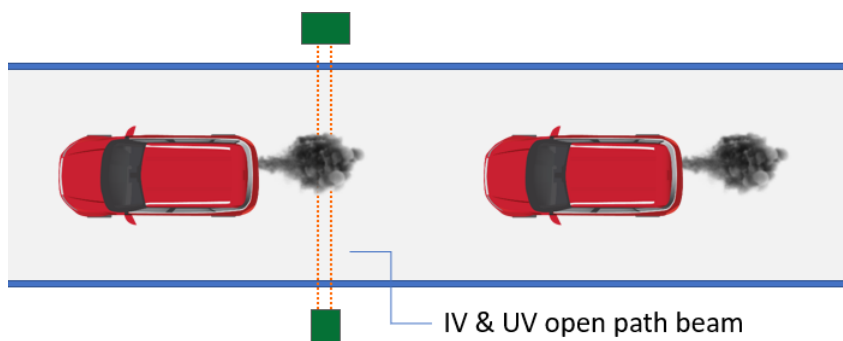
Standort	Datum	von Stunde	bis Stunde
SEEGRABEN	21.10.2019	15	18
SEEGRABEN	22.10.2019	07	18
SEEGRABEN	24.10.2019	08	18
SEEGRABEN	25.10.2019	07	17
SEEGRABEN	28.10.2019	07	17
SEEGRABEN	29.10.2019	07	16
SEEGRABEN	30.10.2019	07	17
SEEGRABEN	31.10.2019	07	16
SEEGRABEN	01.11.2019	07	16
SEEGRABEN	04.11.2019	13	16
SEEGRABEN	05.11.2019	08	17
SEEGRABEN	06.11.2019	11	15
SEEGRABEN	07.11.2019	08	17
SEEGRABEN	08.11.2019	08	16
SONNENALLEE	21.10.2019	08	14
SONNENALLEE	23.10.2019	08	18

Die Messungen erfolgten mit dem Messsystem OPUS RSD5000. Das RSD Messsystem erfasst dabei berührungsfrei die Schadstoffkonzentrationen im Abgas vorbeifahrender Fahrzeuge (siehe **Abb. 2-1**).



**Abb. 2-1: Installation des OPUS RSD5000 (© OPUS RSE)**

Bei einer Messung durchqueren die Fahrzeuge eine Lichtschranke aus Ultraviolett - und Infrarotlicht. Je stärker die Absorption des Lichtes in spezifischen Wellenlängen, desto grösser ist die Schadstoffkonzentration in der Abgasfahne. Davon abgezogen wird die Schadstoffkonzentration des Hintergrundes und das resultierende Inkrement wird dem vorbeifahrenden Fahrzeug zugerechnet. Dasselbe wird für  $\text{CO}_2$  gemacht, das gemäß Verbrennungsgleichung proportional zur Masse Kraftstoff ist. Der Quotient der Inkremente entspricht damit einem kraftstoffbezogenen Emissionsfaktor in der Einheit [g Schadstoff je kg Kraftstoff]. Das RSD-System misst also stationär für die vorbeifahrenden Fahrzeuge eine instantane Emissionsrate für den momentanen Fahrzustand. Das Ensemble aller instantanen Emissionsraten deckt erfahrungsgemäß einen breiten Bereich im Motorkennfeld ab und entspricht in der Summe damit Messfahrten, die aus einzelnen instantanen Teilzyklen zusammengesetzt sind. Das OPUS RSD5000 misst dabei die Fahrzeugemissionen in einer Querkonfiguration (horizontal), wie in **Abb. 2-2** gezeigt.



**Abb. 2-2: Schematische Darstellung des OPUS RSD5000-Systems (© OPUS RSE)**

Die Schadstoffkonzentrationen werden für jedes Fahrzeug erfasst und in einer CPU im RSD-System gespeichert. Die für jedes Fahrzeug erfassten Daten sind:

- Gasförmige Schadstoffe:  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{KW}$ , und Partikelmasse/Opazität (bestimmt aus der Trübung)
- Datum und Uhrzeit der Aufzeichnung
- Kennzeichen
- Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs

- Wetter- und Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck sowie Anfang und Ende eines Regenereignisses):

Hinweis: RSD-Messungen haben in der Vergangenheit Winddaten mit aufgezeichnet, um diese in die Analyse und Bewertung der RSD-Messdaten einzubeziehen. Die Erfahrungen von OPUS RSE aus vielen Messkampagnen zeigten, dass z.B. die Einbeziehung der Windgeschwindigkeit oder -richtung nicht der beste Analyseansatz ist. Besser ist es, die Konsistenz der Abgaswolke zu bestimmen und daraus abzuleiten, welche Datensätze für die Analyse nicht geeignet sind, z.B. wenn starke Winde, starke Turbulenzen, eine zu starke Verdünnung der Abgaswolke oder andere äußere Phänomene vorliegen. Das angebotene System analysiert deshalb automatisch die Größe der Abgaswolke. Wenn die Größe der Abgasfahne einen bestimmten Wert unterschreitet, wird der Datensatz als ungültig markiert.

- Abgastemperatur bzgl. Kaltstart: Das angebotene OPUS-System misst die Abgastemperatur nicht direkt, sondern markiert Messungen, die möglicherweise mit einem „Kaltstart“ zusammenhängen, als ungültig. Dies erfolgt mit einer weit verbreiteten Methode anhand der Messung von Kohlenwasserstoffen, wie unten erläutert.

Während die Daten gesammelt werden, überprüft die hochentwickelte OPUS Accuscan™-Software zur Validierung der Abgasfahne jede Messung in Echtzeit.

Um z. B. festzustellen, ob ein Fahrzeug im Zustand „kalter“ oder „heißer“ Motor betrieben wird, wird ein Algorithmus verwendet, der die Kohlenwasserstoffemissionen jedes Fahrzeugs analysiert. Diese ist in o. g. Software implementiert, um Messungen an kalten Fahrzeugen zu verwerfen (was normalerweise ein ungültiger Datensatz ist). Diese Software soll auch sicherstellen, dass die vorherrschenden Hintergrundwerte stabil sind und genau bestimmt werden können. Gültige Messungen, die die Echtzeitfilter bestanden haben, werden entsprechend gekennzeichnet.

Das RS Verfahren beruht auf der Absorptionsspektroskopie. Dabei wird die Konzentration [C] bestimmter Moleküle (hier: bestimmter Schadstoffe im Abgas) im Lichtweg gemessen. Diese Moleküle stammen sowohl aus der Abgasfahne des vorbeifahrenden Fahrzeuges als auch aus der „Hintergrund“luft auf Höhe des Auspuffs bzw. des Lichtstrahls hinter dem Fahrzeug.

$$[C]_{\text{total}} = [C]_{\text{Abgas}} + [C]_{\text{Hintergrund (am Auspuff)}}$$

Als Hintergrund wird die Konzentration angesetzt, die unmittelbar vor Durchqueren der Lichtschranke durch das Fahrzeug gemessen wurde.

$$[C]_{\text{Hintergrund (am Auspuff)}} \equiv [C]_{\text{vor dem Fahrzeug}}$$

Die Differenz zwischen der Konzentrationsmessung hinter und vor dem Fahrzeug wird dem Abgas zugeschrieben.

$$[C]_{\text{Abgas}} = [C]_{\text{total}} - [C]_{\text{vor dem Fahrzeug}}$$

Aus zwei Gründen kann es dabei zu negativen Konzentrationen kommen, die je eine eigene Interpretation haben:

a) Wenn die Luft vor dem Fahrzeug besonders viel Schadstoff enthält, dann kann diese durch die Turbulenz bis zum Ende Fahrzeuges stark verdünnt werden. Dann ist die Hintergrundkonzentration vor dem Fahrzeug deutlich höher als dahinter. Wenn das Fahrzeug selbst dann auch noch relativ wenig Schadstoff ausstößt, dann kann die Konzentration in der Abgasfahne (inklusive des dortigen Hintergrundes) niedriger sein als vor dem Fahrzeug, und somit die Differenz negativ werden.

b) Jedes Messgerät hat statistische Schwankungen und Unsicherheiten. So liegt die Messgenauigkeit für NO beispielsweise bei 100 bis 225 ppm (je nach CO<sub>2</sub>-Dichte in der Abgasfahne). Der reale Emissionswert von modernen Benzin-Pkw liegt in der Größenordnung von 50 ppm NO (ca. 70 mg pro km). Unter Berücksichtigung der statistischen Schwankungen können daher die Messwerte zwischen -50 bis 150 ppm liegen (mit Mittelwert 50 ppm). Würde man die negativen Emissionswerte verwerfen, würde der Durchschnittswert zu hoch sein.

Negative Emissionsraten sind zwar unphysikalisch, lassen sich aber vom Messprinzip her nachvollziehen; sie müssen in der Auswertung berücksichtigt werden, um keinen positiven Bias zu erhalten. Negative Emissionsraten kommen umso häufiger vor, je niedriger das genuine Emissionsniveau eines Fahrzeuges ist.

Die erreichbare Genauigkeit der Messungen (Präzision und Unsicherheit) wird von OPUS RSE für jede Komponente wie folgt angegeben.

Die Systempräzision liegt bei 15 % und die Messunsicherheit für die Einzelkomponenten sind in **Tab. 2-2** aufgeführt.

**Tab. 2-2: Messgenauigkeit des OPUS RSD5000**

Schadstoffkonzentration	OPUS RSD5000 Messgenauigkeit
CO / CO <sub>2</sub> [% / %]	0.0034
NO / CO <sub>2</sub> [ppm / %]	2.56
NO <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> [ppm / %]	10
HC / CO <sub>2</sub> [ppm / %]	1.67

Die primäre Messgröße im RSD Verfahren sind die Konzentrationen der Schadstoffe, sekundär dann der Quotient der Inkremente von Schadstoff zu CO<sub>2</sub>. Für diesen Quotienten gilt die in **Tab. 2-2** angegebene Genauigkeit. Dabei ist zu beachten, dass es eine absolute Messgenauigkeit gibt, weshalb die (relative) Unsicherheit bei besonders niedrigen Emissionsraten (also relativ sauberen Fahrzeugen) deutlich wächst.

Die Umrechnung von der Einheit [Gramm je Kilogramm Kraftstoff] auf die Einheit [Gramm je Kilometer] führt weitere Unsicherheiten ein, insbesondere die Schätzung des instantanen Kraftstoffverbrauchs. Eine vollständige Fehlerfortpflanzung wurde bisher aber nicht gemacht.

Das Überprüfungs- und Kalibrierungsverfahren ist nachstehend definiert:

*Überprüfung des OPUS RSD5000 außerhalb des Messstandorts:*

- Eine vierteljährliche Zertifizierung der Hardware, Software und des Systems wird von der zuständigen Behörde durchgeführt, um die Einhaltung der technischen Spezifikationen sicherzustellen (z. B. COVERS in Colorado).
- Die jährliche Kalibrierung und Zertifizierung der meteorologischen Sensoren wird durch das Spanish Metrology Center (CEM) durchgeführt.
- Alle zwei Jahre erfolgt die Kalibrierung und Zertifizierung der Geschwindigkeits- / Druckmodule durch das Spanish Metrology Center (CEM).
- Jährliches ISO-17025-Audit: Zertifizierung von Schadgasfernmessungen mit ISO-zertifizierten Gasflaschen in einer kontrollierten Laborumgebung. Zertifikat ausgestellt von der Nationalen Akkreditierungsstelle Spaniens (ENAC).
- Jährliches ISO-17025-Audit: Zertifizierung von Schadgasfernmessungen mit ISO-zertifizierten Gasflaschen, die in einem Elektrofahrzeug eingebaut und unter Straßenbedingungen getestet wurden. Zertifikat ausgestellt von der Nationalen Akkreditierungsstelle Spaniens (ENAC).

### *Überprüfung vor dem Projekt:*

Die Messeinheiten werden in OPUS RSE-Einrichtungen getestet, bevor sie an die Projektstandorte geliefert werden.

### *OPUS RSD5000 Überprüfungen vor Ort:*

- Tägliche Systemkalibrierung zu Beginn der Messung (Abgasmessungen und Geschwindigkeits- / Beschleunigungsmodul).
- Audits typischer Abgasgemische werden in regelmäßigen Abständen während des Tages oder auf Anforderung der zuständigen Behörde durchgeführt, um die Systemleistung oder die rechtliche Vertretbarkeit der zur Durchsetzung verwendeten Daten zu überprüfen.

### *OPUS RSD5000: Post-processing der Daten*

- Im Vergleich der Emissionsraten zwischen den beiden Messgeräten ist ein konstanter Offset zwischen den Geräten aufgefallen. Durch Rückgriff auf die anfängliche Kalibrierung konnte der richtige Wert identifiziert und der Offset in den Daten des anderen Messgerätes korrigiert werden. Diese Korrektur wurde durch den erstmaligen Parallelbetrieb zweier baugleichen Messgeräte ermöglicht.
- Die Auswertung der Absorptionsspektren nach NO und NO<sub>2</sub> ist schwierig wegen zahlreichen Interferenzen mit anderen Spurenstoffen, insbesondere Wasser. Wenn dann zudem kleine Absorptionsraten über kleinen CO<sub>2</sub>-Inkrementen dividiert werden, können sehr große absolute Werte entstehen, positive wie negative. Diese wurden einer sorgfältigen Nachprüfung unterzogen, weil sie ansonsten den Mittelwert verfälschen würden (mehr im Kapitel 3.4: NO<sub>2</sub> / NO<sub>x</sub> – Verhältnis).

Das OPUS RSD5000 kann die Abgasemissionen aller vorbeifahrenden Fahrzeuge messen: PKW, Lieferwagen, Taxis, Motorräder, Lastwagen, Busse usw. sowohl für hoch als auch für gering emittierende Fahrzeuge. Allerdings kann es sein, dass die Abgasfahne nicht zuverlässig erfasst wird, wenn das Endrohr z.B. das Abgas nach oben (oder auch unten) bzw. seitlich ableitet. Daher ist auch in der vorliegenden Messkampagne die Rate der gültigen Messungen bei den Pkw und den LNF am höchsten.

Eine ausführliche Beschreibung des Messsystems OPUS RSD5000 ist im **Anhang 1** enthalten.

Um möglicherweise fehlerhafte, einzelne Fahrzeuge („High Emitter“) verlässlich identifizieren zu können, sind wiederholte Messungen desselben Fahrzeuges nötig. Eine einzelne, möglicherweise erhöhte instantane Emissionsrate kann der Fahrsituation und vielen anderen Umständen geschuldet sein. Mehrfach gemessene, stark erhöhte

Emissionsraten sind jedoch ein Hinweis auf systematische Unregelmäßigkeiten in der Abgasreinigung. Wie viele wiederholte Messungen für eine sichere Bestimmung benötigt werden, ist bisher nicht bestimmt. Qualitativ ist klar, dass bei einer sehr hohen Schwelle für eine „auffällige“ Emissionsrate (z.B. ein Vielfaches des Emissionsgrenzwertes) tendenziell weniger Messwerte für eine Bestimmung nötig sind. Allerdings lässt eine sehr hohe Schwelle eventuell auch etliche Fahrzeuge mit nicht gut eingestellter Abgasreinigung unentdeckt passieren. Um eine relativ hohe Anzahl von Messwerten für ein und dasselbe Fahrzeug zu erreichen, wurden während der gesamten Messperiode an beiden Standorten jeweils zwei RSD-Geräte hintereinander aufgebaut, um zu ermöglichen, dass jedes Fahrzeug mindestens zweimal gemessen wird.

## **2.2 Auswertung der Kennzeichen und Vergleich mit RSD-Messungen**

### **2.2.1 Kennzeichenauswertung**

Die bei der Abgasmessung erfassten Kennzeichen wurden nach den Vorgaben der Zulassungsbehörde Berlin (Kennzeichen der in Berlin zugelassenen Fahrzeuge) und des Kraftfahrtbundesamtes (für nicht in Berlin zugelassene Fahrzeuge mit deutschen Kennzeichen) aufbereitet und den Behörden für einen Kennzeichenabgleich übergeben.

Von den Zulassungsbehörden wurden folgende Daten abgefragt:

- Jahr der Erstzulassung,
- Fahrzeughersteller und Modell,
- Fahrzeugklasse und Aufbauart,
- Kraftstoff/Antrieb,
- Emissionsklasse (Emissionsschlüsselnummer),
- Hubraum,
- Motorleistung in kW,
- Leergewicht,
- Gesamtgewicht, Fahrzeuglänge,
- Zahl der Achsen,
- Anzahl der Sitzplätze und der Stehplätze (Busse),
- CO<sub>2</sub>-Emissionswert für Pkw (soweit vorhanden) und
- soweit vorliegend: Ausrüstung mit Partikelfilter, SCR-Hardware-Nachrüstung und/oder Software-Update.

Die auf dieser Basis von den Behörden übermittelten technischen Fahrzeugdaten wurden hinsichtlich der folgenden Kriterien ausgewertet:



- Fahrzeug-Kategorie (Pkw, leichtes Nutzfahrzeug, schweres Nutzfahrzeug, Reisebus, Linienbus, Motorrad) nach HBEFA und Anzahl von mobilen Arbeitsmaschinen und Geräten
- Antrieb
- Alter
- Länge und Gewicht
- Abgasnorm gemäß Typgenehmigung
- Fahrzeugschicht nach Handbuch für Emissionsfaktoren
- Abgasminderungssystem (Partikelfilter, SCR-Nachrüstung), soweit angegeben und Darstellung als eigene Fahrzeugschichten, sofern im HBEFA nicht vorgesehen.
- Software-Update zur NO<sub>x</sub>-Minderung (soweit verfügbar) und Darstellung als eigene Fahrzeugschichten, sofern im HBEFA nicht vorgesehen.

### 2.2.2 Auswertung der Emissionen

Schwerpunkt der Auswertung der RSD-Messungen ist der Vergleich zwischen den Emissionsraten, wie sie mit RSD an der Messstelle gemessen werden und den Typprüfgrenzwerten sowie den Emissionsfaktoren nach HBEFA für die Verkehrssituation und die jeweilige Fahrzeugschicht. Damit sollen querschnittsbezogene, instantane Emissionsraten mit streckenbezogenen, durchschnittlichen Emissionsfaktoren verglichen werden. Dabei sind auch die Messeinheiten [Gramm Schadstoff je Kilogramm Kraftstoff aus der RSD-Messung] und [Gramm Schadstoff je Kilometer bei den Emissionsfaktoren] unterschiedlich und müssen zunächst vergleichbar gemacht werden. Da somit verschiedene Größen verglichen werden, ist der direkte Vergleich nur bedingt aussagekräftig. Im Gegenteil, es sind Unterschiede zu erwarten.

Beide Probleme lassen sich nach einem Verfahren lösen, das im CONOX Projekt zusammen mit Hr. Prof. S. Hausberger entwickelt wurde<sup>1</sup> (siehe Anhang 3): Aus den Fahrwiderständen wird der instantane Leistungsbedarf abgeschätzt; dabei werden Standardparameter für Luft- und Rollwiderstand, sowie Rotationsenergie und Getriebeverluste aus dem Berechnungsmodell PHEM (das auch die Basisemissionsfaktoren des HBEFA liefert) für jede Fahrzeugkategorie angesetzt.

---

<sup>1</sup> Borken-Kleefeld, J., Hausberger, S. et al., "Comparing Emission Rates Derived from Remote Sensing with PEMS and Chassis Dynamometer Tests - CONOX Task 1 Report" (Gothenburg, Sweden: IVL Swedish Environmental Research Institute, May 2018) – Im Auftrag für das Bundesamt für Umwelt (Schweiz). In der Aktualisierung S.Hausberger, vom 13 Jan 2020.

Eingangsgrößen aus der Messung sind die Geschwindigkeit und Beschleunigung, sowie das jeweilige Fahrzeuggewicht (Leergewicht + Load-Factor entsprechend Annahmen in PHEM (vgl. Anhang 3)).

Ein positiver Leistungsbedarf korreliert wiederum linear mit dem Kraftstofffluss. Der Kraftstofffluss bei einer gemessenen Geschwindigkeit  $v$  entspricht dem Kraftstoffbedarf pro Wegstrecke.

$$FC \left[ \frac{g}{km} \right] = \frac{FC \left[ \frac{g}{h} \right]}{v \left[ \frac{km}{h} \right]}$$

Damit kann nun die gemessene Emissionsrate in [Gramm Schadstoff je Kilogramm Kraftstoff] umgerechnet werden in eine Emissionsrate [Gramm Schadstoff je Kilometer Wegstrecke.]

Für Busse und schwere Nutzfahrzeuge erfolgte für den Vergleich mit den Typprüfgrenzwerten eine Umrechnung der Emissionsrate von [Gramm Schadstoff je Kilogramm Kraftstoff] in [Gramm Schadstoff je kWh].

Dies erfolgte nach der untenstehenden Formel, wobei der Wirkungsgrad des Dieselmotors mit 0.26 Liter / kWh angenommen wird. Dieser Wert wurde aus Herstellerangaben von Volvo Trucks übernommen. Aufgrund fehlender weiterer Herstellerangaben wurde dieser Wert für alle Busse und schweren Nutzfahrzeuge verwendet. Die Dichte für Diesel wurde mit 0.81 kg / Liter angenommen, sodass sich für alle Busse und SNF ein konstanter Umrechnungsfaktor von 0.21 ergibt.

$$E \left[ \frac{g}{kWh} \right] = E \left[ \frac{g}{kg Diesel} \right] \cdot \eta \left[ \frac{l Diesel}{kWh} \right] \cdot \rho \left[ \frac{kg Diesel}{l Diesel} \right]$$

Der Vergleich der Messwerte mit den Emissionsfaktoren nach PHEM wurde ausschließlich für die PKW vorgenommen. Dazu wurde für jede Fahrzeugschicht das Ensemble der gemessenen instantanen Emissionsraten als Funktion der Motorlast (berechnet aus der gemessenen Geschwindigkeit und Beschleunigung) ausgewertet. Diese Basisemissionsfaktoren können dann mit den Basisemissionsfaktoren für das HBEFA verglichen werden. Umgekehrt wurden ebenfalls die am Querschnitt gemessenen instantanen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in das Berechnungsmodell PHEM eingespeist, um so den durchschnittlichen Emissionsfaktor exakt für die

Querschnittssituation zu berechnen. Nur so wird letztlich Gleiches mit Gleichem verglichen und mögliche Unterschiede sind dann auf die Basis-Emissionsfaktoren zurückzuführen.

Die Vorauswertung der Daten durch OPUS RSE erlaubt es auch, dass nur warme Emissionsfaktoren verglichen werden.

Die für die Einzelfahrzeuge bestimmten Emissionsfaktoren werden nach den folgenden Kriterien zusammengefasst und ausgewertet:

1. Statistische Auswertung der gemessenen Emissionsfaktoren nach Fahrzeugkategorie, Antriebs- und Emissionskonzept (Beispiel: Mittelwert und Standardabweichung, Maximum und Minimum der Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw des Abgasstandards Euro 5).
2. Statistische Auswertung des Vergleichs zwischen gemessenen Emissionsfaktoren, Emissionsgrenzwerten und Emissionsfaktoren nach HBEFA.
3. Statistische Auswertung des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses
4. Vergleich der Emissionsfaktoren zwischen verschiedenen Abgasnormen bei gleicher Fahrzeugkategorie und Antrieb, z. B. zwischen Diesel-Pkw Euro 4, 5, Euro 6a-c und Euro 6 d(TEMP).
5. Falls mehrfache RS Messwerte für einzelne Fahrzeuge vorliegen, kann untersucht werden, ob es sich möglicherweise um hoch emittierende Fahrzeuge („High Emitters“) handelt. Zur Definition schlagen wir den Bezug zum Emissionsgrenzwert vor und stimmen mit dem Auftraggeber einen Korrekturfaktor für den Realbetrieb vor. Falls Fahrzeuge dann wiederholt oberhalb eines Schwellenwertes gemessen werden, können wir die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der es sich um einen „High Emitter“ handelt – jeweils differenziert je Fahrzeugschicht<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Qiu & Borken-Kleefeld: „Identification of high-emitting vehicles needs a few records (only)“ CARES Deliverable 4.4 – (draft 30 Sep 2019)

### 3 AUSWERTUNG

#### 3.1 Deskriptive Statistik der Kennzeichenauswertung und fahrzeugspezifische Messdatenzuordnung

Im Rahmen der RSD-Messungen wurden insgesamt 60 564 unterschiedliche Kennzeichen erfasst, wovon 58 096 Kennzeichen Fahrzeugen zugeordnet werden konnten, die in Deutschland zugelassen sind. (siehe **Tab. 3-1**). Die Datenabfrage dieser Kennzeichen beim KBA bzw. bei der Berliner Zulassungsbehörde bzgl. der entsprechenden Motordaten ergab einen Rücklauf von insgesamt 55 334 Kennzeichen.

Nach Verlinkung der Motordaten zu den erfassten RSD-Daten konnten die Motordaten von insgesamt 53 457 Kennzeichen bzw. Fahrzeugen den RSD-Daten zugeordnet werden. Die Stichprobenanzahl, d.h. die Anzahl der RSD-Messwerte pro Fahrzeug, sind – differenziert nach validen / nicht validen sowie Fahrzeugkategorie und Euro-Abgasnorm - in **Tab. 3-2** bis **Tab. 3-5** dargestellt. Als valide Messwerte wurden dabei Messwerte betrachtet, bei denen die Kinematikparameter „S/A flag“ (speed/ acceleration) und „VSP Status“ (vehicle specific power) sowie die Kalibrierungsparameter „CalStatus“ und „AuditStatus“ valide Werte aufwiesen.

Die Anzahl der validen RSD-Messwerte unterscheidet sich in Abhängigkeit vom betrachteten Schadstoff und ist bei Kohlenwasserstoffen (HC) z.T. deutlich niedriger als bei Stickoxiden oder PM. Die nach Schadstoff unterschiedliche Rate an gültigen Messwerten ist typisch für RSD-Messungen: Sie liegt zum einen an der Absorptionsspektroskopie als Messprinzip, wo unterschiedliche Moleküle verschieden stark ausgeprägte charakteristische Spektren haben (am wenigsten die Kohlenwasserstoffe und ‚black smoke‘). Zum anderen hängt eine gültige Schadstoffmessung auch davon ab, wie sehr sich der Schadstoff in der aktuellen Abgaswolke von der Schadstoffkonzentration im Straßenhintergrund abhebt. Bei gut geregelten Benzin-Pkw ist eben der Ausstoß an unverbrannten Kohlenwasserstoffen sehr gering und damit das Inkrement gegenüber dem Straßenhintergrund häufig im Bereich des statistischen Rauschens. Das ist anders bei den Emissionen von Stickoxiden aus Dieselfahrzeugen, die zu deutlichen Konzentrationsspitzen führen. Der Schwerpunkt der weiteren Auswertung, insbesondere der Vergleich mit den RSD-Messung/Emissionsfaktoren in PHEM bzw. HBEFA (siehe Abschnitt 3.3) liegt in der Betrachtung der Fahrzeugkategorie „PKW“. Wie in **Abb. 3-1** dargestellt, liegt der Fahrleistungsanteil der PKW mit alternativem Motorantrieb (Elektro, Gas, bivalent) an den beiden Untersuchungsquerschnitten bei ca. 4 %. Auch bei den übrigen Fahrzeugkategorien liegt der Fahrleistungsanteil der alternativen Antriebskonzepte mit ca. 1 % (LNF) sowie 0.3 % (SNF) bzgl. des Flotteneinflusses im irrelevanten Bereich. Der Fahrleistungsanteil ergibt sich

dabei aus den Häufigkeiten der erfassten Fahrzeuge. Auf Grund dessen beziehen sich die weiteren Auswertungen bei allen betrachteten Fahrzeugkategorien ausschließlich auf die Antriebsarten „Benzin“ und „Diesel“.

**Tab. 3-1: Datenrücklauf der Kennzeichenerfassung**

	Ausländische Kennzeichen	Berliner Kennzeichen	auswärtige deutsche Kennzeichen	gesamt
erfasste Kennzeichen	2 468	30 694	27 402	60 564
Anfrage Zulassungsstelle		30 694	27 402	<b>58 096</b>
Rücklauf von Zulassungsstellen				
kein Rücklauf		2 207	555	2 762
Zweirad, Trike, Quad		156	64	220
PKW		23 570	21 608	45 178
Kleinbus (<5t)		3	1	4
Bus (>5t)		79	20	99
LNf		3 520	3 402	6 922
SNF (<12t)		392	372	764
SNF (>12t)		258	389	647
Anhänger		360	851	1 211
SAM		39	1	40
Sonderfahrzeug		107	132	239
Zugmaschine		3	7	10
Rücklauf gesamt		28 487	26 847	<b>55 334</b>
Zuordnung Fahrzeug-ID mit Messdaten				
Zweirad, Trike, Quad		149	61	210
PKW		23 341	21 501	44 842
Kleinbus (<5t)		1	-	1
Bus (>5t)		78	20	98
LNf		3 513	3 399	6 912
SNF (<12t)		378	371	749
SNF (>12t)		258	387	645
gesamt		27 718	25 739	<b>53 457</b>

**Tab. 3-2: Anzahl aller erfassten Messwerte Bus, LNF und PKW nach Messgerät und Standort**

Vehicle	Fuel	EuroStd	SEEGRABEN			SONNENALLEE			beide Standorte beide Geräte	
			Geräte-ID: 5049	Geräte-ID: 5064	gesamt	Geräte-ID: 5049	Geräte-ID: 5064	gesamt		
Bus (>5t)	Diesel	EURO 3	1	2	3	6	5	11	14	
		EURO 5	8	4	12	42	48	90	102	
		EURO 6ab	21	21	42	71	80	151	193	
Kleinbus (<5t)	Diesel	EURO 6ab	1	1	2			-	2	
LNF	alternativ	EURO 1	1	-	1	-	-	-	1	
		EURO 2	2	-	2	-	-	-	2	
		EURO 3	1	-	1	-	-	-	1	
		EURO 4	18	17	35	6	7	13	48	
		EURO 5	19	15	34			-	34	
		EURO 6ab	24	24	48	3	1	4	52	
	Benzin	EURO 0	6	4	10	-	-	-	10	
		EURO 1	5	5	10	2	2	4	14	
		EURO 2	6	4	10	7	7	14	24	
		EURO 3	10	4	14	1	1	2	16	
		EURO 4	48	43	91	13	14	27	118	
		EURO 5	67	62	129	18	18	36	165	
		EURO 6ab	94	83	177	21	19	40	217	
		EURO 6c	4	3	7	1	1	2	9	
	EURO 6d-Temp	18	13	31	2	2	4	35		
	Diesel	EURO 0	6	7	13	-	1	1	14	
		EURO 1	11	4	15	1	1	2	17	
		EURO 2	45	38	83	2	3	5	88	
		EURO 3	285	241	526	64	67	131	657	
		EURO 4	996	883	1 879	249	238	487	2 366	
		EURO 5	2 618	2 158	4 776	384	380	764	5 540	
		EURO 6ab	2 804	2 414	5 218	424	448	872	6 090	
		EURO 6c	151	130	281	22	27	49	330	
	EURO 6d-Temp	71	64	135	15	15	30	165		
	EURO 6d	7	6	13	1	1	2	15		
	PKW	alternativ	EURO 0	2	1	3	-	-	-	3
			EURO 1	3	1	4	1	1	2	6
			EURO 2	39	29	68	6	5	11	79
EURO 3			43	34	77	20	20	40	117	
EURO 4			398	344	742	88	92	180	922	
EURO 5			400	325	725	114	111	225	950	
EURO 6ab			523	435	958	111	119	230	1 188	
EURO 6c			183	160	343	75	77	152	495	
EURO 6d-Temp		402	340	742	51	51	102	844		
EURO 6d		5	4	9	-	-	-	9		
Benzin		EURO 0	22	11	33	1	1	2	35	
		EURO 1	121	112	233	28	25	53	286	
		EURO 2	474	432	906	108	115	223	1 129	
		EURO 3	1 220	990	2 210	319	328	647	2 857	
		EURO 4	8 338	6 998	15 336	1 611	1 694	3 305	18 641	
		EURO 5	6 383	5 316	11 699	654	722	1 376	13 075	
		EURO 6ab	7 384	6 235	13 619	806	870	1 676	15 295	
		EURO 6c	505	411	916	87	91	178	1 094	
EURO 6d-Temp		2 354	1 975	4 329	288	311	599	4 928		
EURO 6d		29	23	52	4	4	8	60		
Diesel		EURO 0	14	18	32	5	5	10	42	
		EURO 1	8	10	18	1	1	2	20	
		EURO 2	89	86	175	16	17	33	208	
		EURO 3	777	649	1 426	155	157	312	1 738	
		EURO 4	2 631	2 166	4 797	529	538	1 067	5 864	
		EURO 5	5 720	4 763	10 483	687	724	1 411	11 894	
		EURO 6ab	7 428	6 281	13 709	846	865	1 711	15 420	
		EURO 6c	1 180	978	2 158	218	222	440	2 598	
EURO 6d-Temp	2 339	1 963	4 302	206	214	420	4 722			
EURO 6d	29	28	57	3	3	6	63			

**Tab. 3-3: Anzahl aller erfassten Messwerte SNF und Zweirad nach Messgerät und Standort**

Vehicle	Fuel	EuroStd	SEEGRABEN			SONNENALLEE			beide Standorte
			Geräte-ID: 5049	Geräte-ID: 5064	gesamt	Geräte-ID: 5049	Geräte-ID: 5064	gesamt	beide Geräte
SNF (<12t)	alternativ	EURO 5	1	1	2	1	1	2	4
	Diesel	EURO 0	7	4	11	2	2	4	15
		EURO 1	3	3	6	-	1	1	7
		EURO 2	18	15	33	1	1	2	35
		EURO 3	42	38	80	7	9	16	96
		EURO 4	88	69	157	10	8	18	175
		EURO 5	265	208	473	24	27	51	524
		EURO 6ab	150	98	248	5	6	11	259
		EURO 6c	164	135	299	14	7	21	320
EURO 6d-Temp	95	63	158	5	2	7	165		
SNF (>12t)	alternativ	EURO 6ab	1	1	2	1	-	1	3
	Diesel	EURO 1	-	1	1	-	-	-	1
		EURO 2	4	4	8	-	-	-	8
		EURO 3	25	12	37	3	3	6	43
		EURO 4	31	25	56	-	-	-	56
		EURO 5	161	107	268	16	12	28	296
		EURO 6ab	421	330	751	20	15	35	786
Zweirad, Trike, Quad	Benzin	EURO 0	29	22	51	11	13	24	75
		EURO 1	14	9	23	4	5	9	32
		EURO 2	10	12	22	4	4	8	30
		EURO 3	34	39	73	11	17	28	101
		EURO 4	30	30	60	3	4	7	67

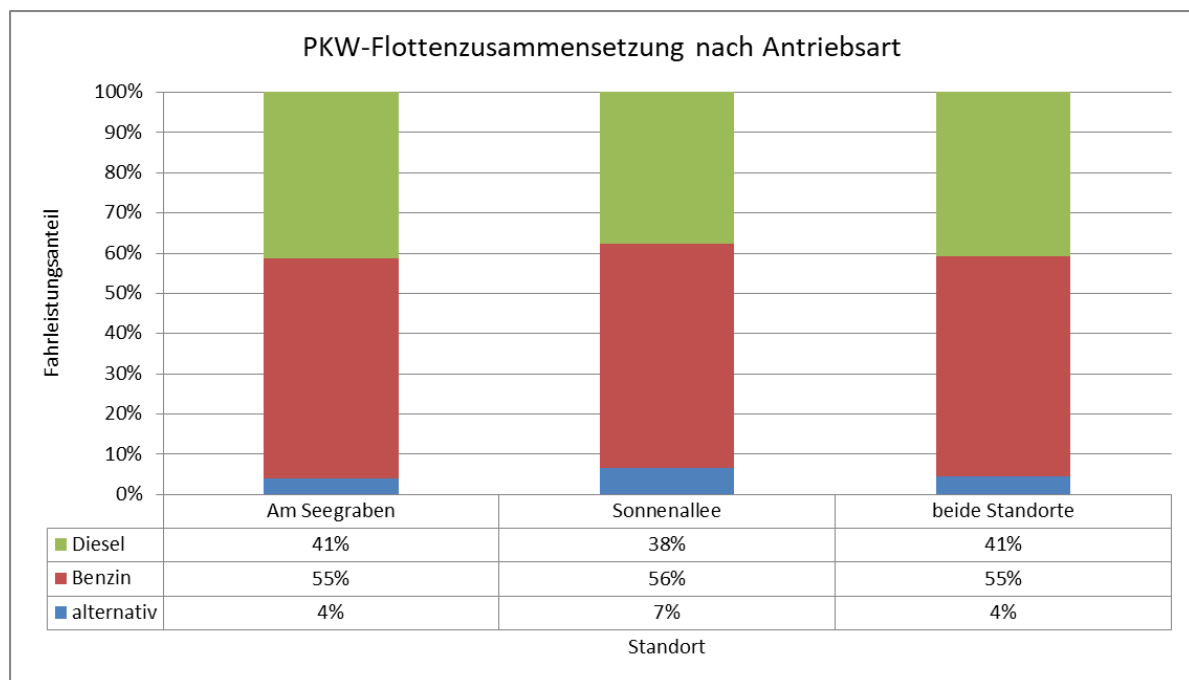
**Tab. 3-4: Anzahl aller validen Messwerte – Antrieb Benzin oder Diesel - Bus, LNF und PKW**

Vehicle	Fuel	EuroStd	beide Standorte, beide Geräte				
			gesamt	CO_Valid	HC_Valid	NO_Valid und NO2_Valid	UVSmoke_Valid
Bus (>5t)	Diesel	EURO 3	14	4	4	4	4
		EURO 5	102	41	34	15	33
		EURO 6ab	193	35	13	25	81
LNF	Benzin	EURO 0	10	8	7	5	8
		EURO 1	14	7	6	6	8
		EURO 2	24	16	16	16	16
		EURO 3	16	9	4	4	8
		EURO 4	118	79	73	76	85
		EURO 5	165	112	93	95	112
		EURO 6ab	217	148	127	135	151
		EURO 6c	9	7	7	7	7
		EURO 6d-Temp	35	9	8	8	9
	Diesel	EURO 0	14	11	9	7	11
		EURO 1	17	6	5	5	7
		EURO 2	88	59	45	50	66
		EURO 3	657	438	353	360	468
		EURO 4	2 366	1 505	1 223	1 250	1 612
		EURO 5	5 540	3 648	3 081	3 035	3 876
		EURO 6ab	6 090	3 926	3 210	3 260	4 233
		EURO 6c	330	217	188	190	228
		EURO 6d-Temp	165	96	83	86	102
EURO 6d	15	13	9	10	13		
PKW	Benzin	EURO 0	35	18	10	3	15
		EURO 1	286	161	139	129	170
		EURO 2	1 129	616	510	492	642
		EURO 3	2 857	1 538	1 275	1 320	1 620
		EURO 4	18 641	10 646	9 110	9 445	11 026
		EURO 5	13 075	7 672	6 513	6 840	7 978
		EURO 6ab	15 295	9 208	7 793	8 107	9 604
		EURO 6c	1 094	651	542	563	686
		EURO 6d-Temp	4 928	3 062	2 627	2 646	3 177
	EURO 6d	60	40	34	35	41	
	Diesel	EURO 0	42	21	18	17	24
		EURO 1	20	14	10	10	15
		EURO 2	208	135	108	104	142
		EURO 3	1 738	915	717	749	976
		EURO 4	5 864	3 067	2 526	2 578	3 286
		EURO 5	11 894	6 422	5 256	5 391	6 962
		EURO 6ab	15 420	8 512	6 879	6 965	9 309
		EURO 6c	2 598	1 409	1 132	1 158	1 533
EURO 6d-Temp		4 722	2 712	2 190	2 252	2 967	
EURO 6d	63	29	24	20	32		

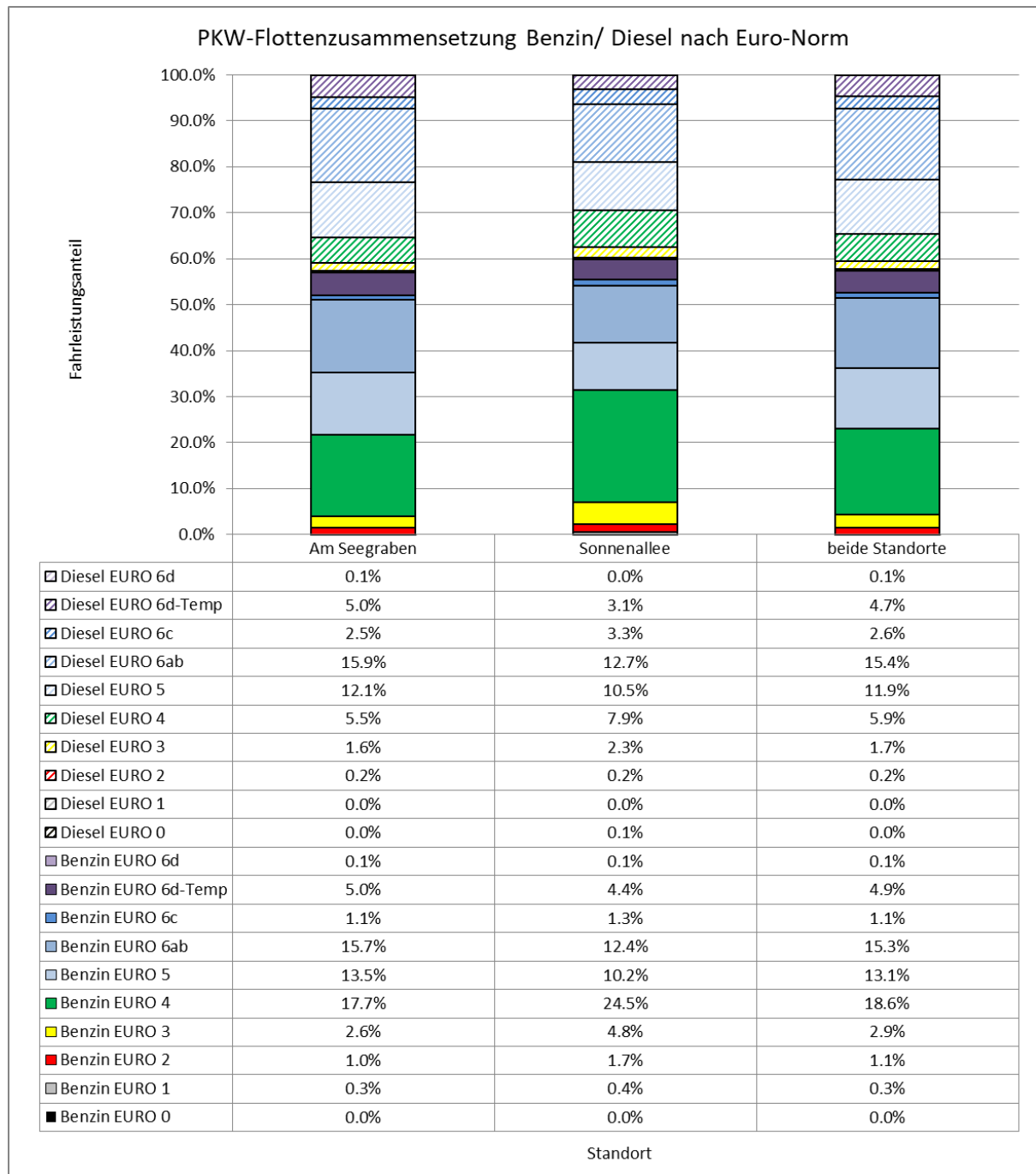


**Tab. 3-5: Anzahl aller validen Messwerte – Antrieb Benzin oder Diesel - SNF**

Vehicle	Fuel	EuroStd	beide Standorte, beide Geräte				
			gesamt	CO_Valid	HC_Valid	NO_Valid und NO2_Valid	UVSmoke_Valid
SNF<12t	Diesel	EURO 0	15	7	5	4	10
		EURO 1	7	6	5	5	6
		EURO 2	35	17	16	14	23
		EURO 3	96	55	47	45	56
		EURO 4	175	121	103	105	128
		EURO 5	524	349	301	277	353
		EURO 6ab	259	158	130	135	168
		EURO 6c	320	201	170	174	212
EURO 6d-Temp	165	103	90	89	116		
SNF>12t	Diesel	EURO 1	1	1	1	1	1
		EURO 2	8	2	1	-	3
		EURO 3	43	21	13	10	25
		EURO 4	56	39	26	26	43
		EURO 5	296	170	121	108	192
		EURO 6ab	786	421	319	352	498



**Abb. 3-1: PKW-Flottenzusammensetzung nach Antriebsart**



**Abb. 3-2: PKW-Flottenzusammensetzung Benzin/ Diesel nach Euro-Norm**

### 3.2 Vergleich emissionskonzeptspezifischer Emissionsfaktoren mit Typzulassungsgrenzwerten

Auf Basis der in Abschnitt **Abb. 3-1** beschriebenen Datenbasis erfolgte eine Auswertung der validen RSD-Messwerte bzgl. Fahrzeugkategorie und Emissionskonzept sowie ein Vergleich mit dem Grenzwert der Typzulassung.

Der Typzulassung von PKW und LNF liegt überwiegend der „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ) zugrunde. Dessen Fahrdynamik ist begrenzt und geht nicht über 22 kW/t vehicle specific power (VSP) hinaus. Für einen adäquaten Vergleich werden die RS Daten daher nur bis zu diesem Wert einbezogen. Bei den Bussen und die SNF wurde dieser nach oben begrenzende Filter nicht gesetzt.

Die Messwerte bei negativem VSP, d.h. beim Bremsen, wurden bei diesem Vergleich generell nicht einbezogen, weil bei negativem VSP der Messfehler tendenziell am Größten ist: wenn kein (oder nur wenig) Schadstoff und CO<sub>2</sub> produziert wird (Motor ohne Last), funktioniert die Erfassung nicht sicher und bei der Bildung des Quotienten der Inkremente  $\Delta_{\text{Schadstoff}} / \Delta_{\text{CO}_2}$  werden sehr kleine Zahlen dividiert, die jeweils eine relativ große Streuung aufweisen können.

Weiterhin wurden Extremwerte („Ausreißer“), die im unteren und oberen 5 %-Bereich der Messwerte lagen, nicht berücksichtigt.

**Abb. 3-3** und **Abb. 3-4** zeigen den Vergleich der Mittelwerte der PKW-NO<sub>x</sub>-RSD-Messwerte - mit den NO<sub>x</sub>-Grenzwerten. Demnach zeigt sich, dass die Mittelwerte der im Rahmen der RSD-Messungen erfassten Realemissionen bei den Emissionskonzepten Euro 3 bis Euro 6c um den Faktor 2.5 bis 8 (Diesel) bzw. 2 bis 2.5 (Benzin) über den Grenzwerten der Typzulassung liegen. Die PKW der Abgasnorm Euro 6d-TEMP bzw. Euro 6-d liegen im Realbetrieb (unter Berücksichtigung des entsprechenden Conformity/Konformitäts-Faktors von 2.1 bei Euro-6d-TEMP bzw. 1.43 bei Euro 6d) bei Euro-6d-TEMP im Bereich des Grenzwertes, bei Euro 6d ca. 60 % unter dem Grenzwert<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Gemäß [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA\\_19\\_2850](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA_19_2850) gilt: “The Commission is today proposing to reinsert the conformity factors for new car models of 2.1 until 2020 and the already revised technical margin of error of 1.43 after 2020 through the legislative procedure requested by the General Court.”

Dabei ist allerdings zu beachten, dass hier

- die durchschnittlichen Emissionen von Fahrzeugen, die z.T. schon viele Jahre in Benutzung waren, mit Neuzulassungswerten verglichen werden; insbesondere bei Benzin-Pkw der Stufen Euro 3 und 4 ist mit einer durchschnittlichen Verschlechterung von 100 % mit 200 000 km Laufleistung zu rechnen (Borken-Kleefeld and Chen 2015). Unter Annahme dieser Verschlechterungsrate passen die entsprechenden Mittelwerte sehr gut zu vorschriftsmäßig niedrigen Neuzulassungswerten.
- die RSD-Emissionsraten einen durchschnittlichen Emissionsfaktor unter Last abbilden, während die Neuzulassungsgrenzwerte über einen Zyklus gemittelt werden, der mindestens zur Hälfte aus Leerlauf- und Abbremsvorgängen besteht. Als Faustregel gilt daher, dass der RSD-Mittelwert durch 2 geteilt werden muss, um ansatzweise mit einem NEFZ-Wert vergleichbar zu sein.

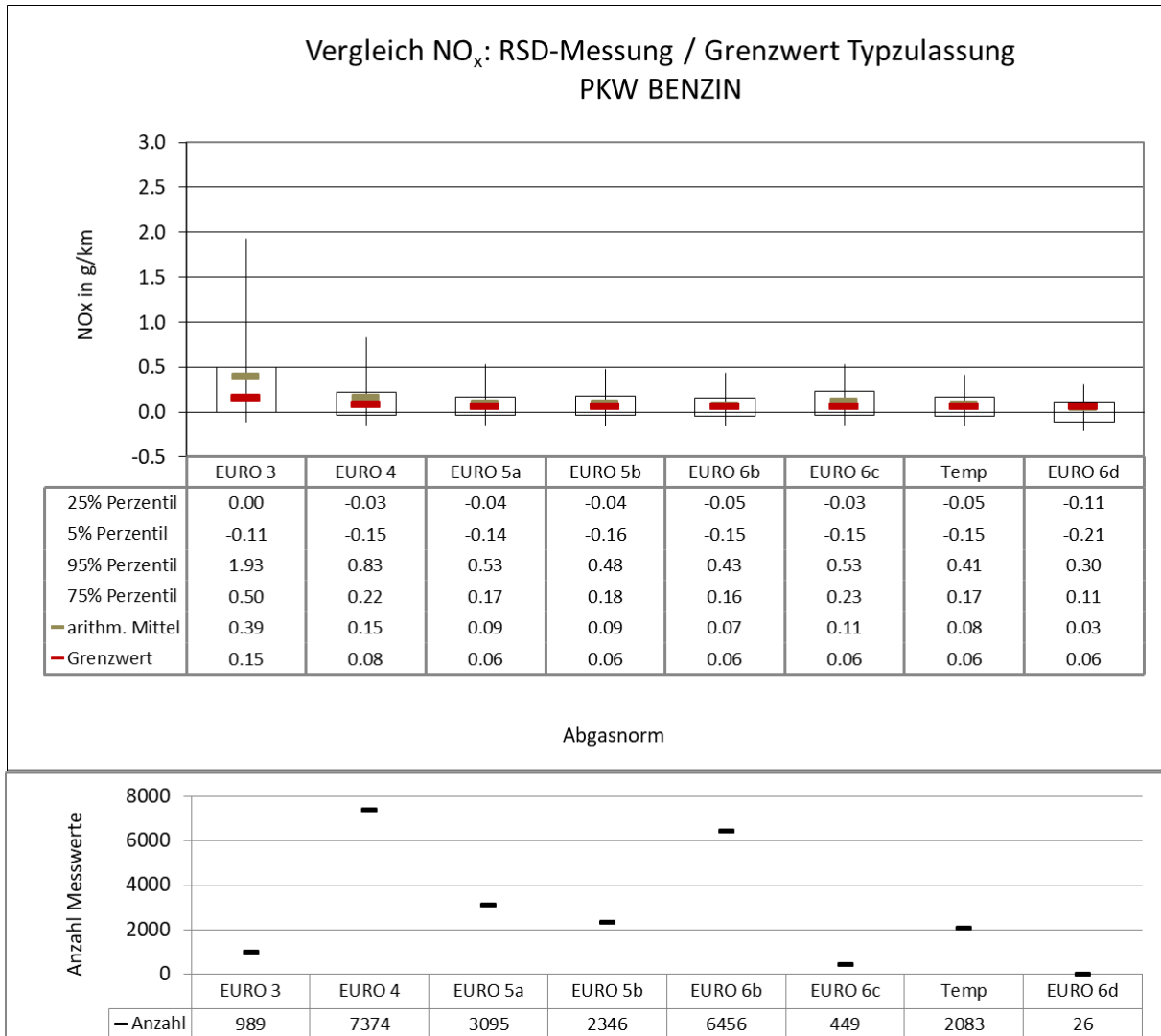
Wenn man das berücksichtigt, ergibt sich für die Benzin-Pkw ein Bild, bei dem die Typprüfgrenzwerte für  $\text{NO}_x$ -Emissionen auch im Realbetrieb (innerorts) quer durch die Flotte eingehalten werden. Umgekehrt bestätigen die RSD-Messungen eindrucksvoll, dass bei mehr als 75% aller gemessenen Fahrbedingungen und Fahrzeugtypen der Diesel Pkw der Euro Stufen 3, 4 und 5 die  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte nicht eingehalten werden. Eine deutliche Verbesserung ist erst mit Euro 6 eingetreten.

Die vergleichenden Abbildungen der weiteren Fahrzeugkategorien „LNF“, „Linienbus“, „Reisebus“ sowie „SNF“ sowie der weiteren betrachteten Schadstoffkomponenten CO, HC und PM10 sind in Anhang 2 enthalten.

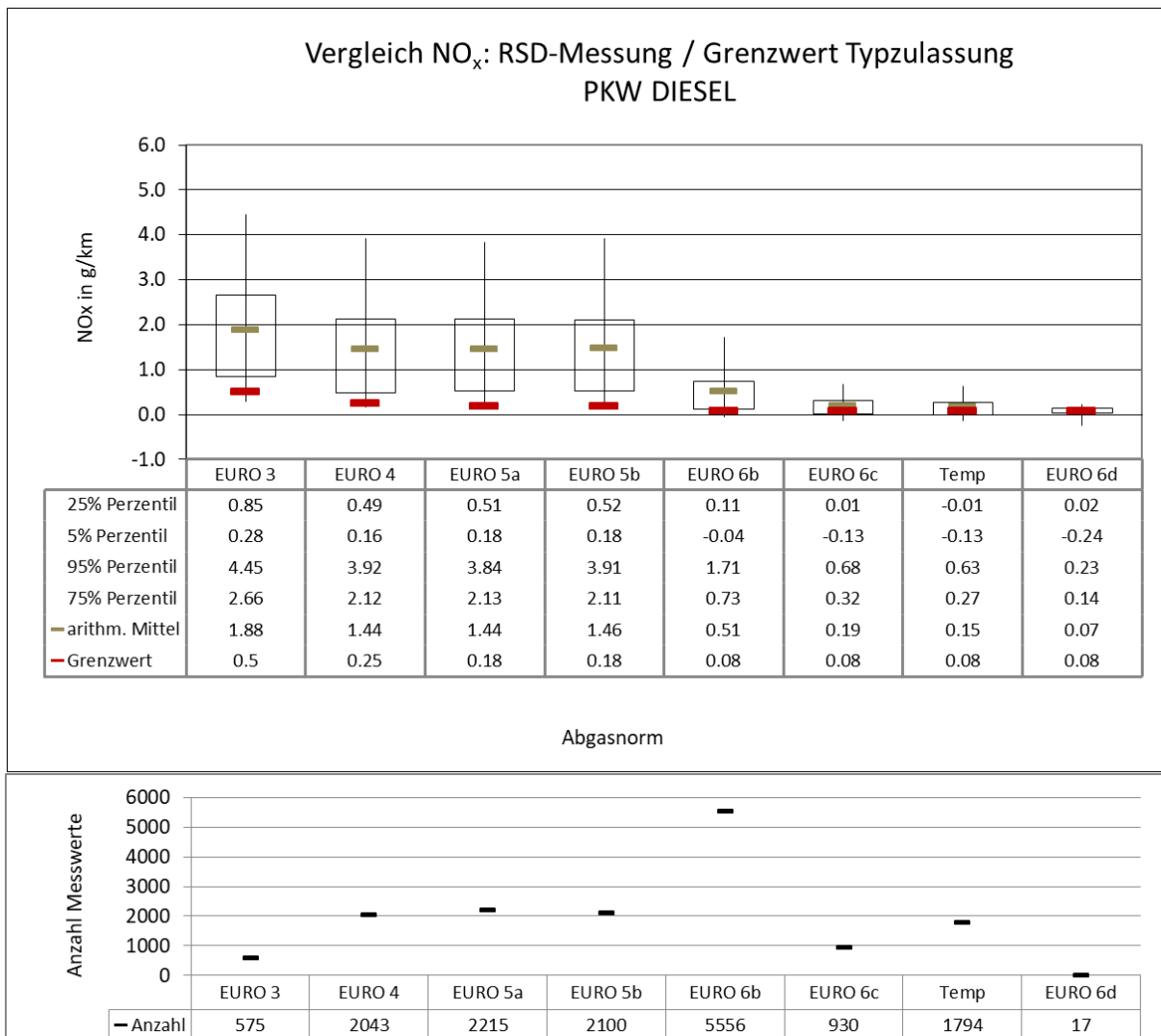
Entsprechend der in Abschnitt 3 aufgezeigten Datenbasis wurden im Rahmen der Messkampagne nicht für alle Kombinationen aus Emissionskonzept und Schadstoffkomponente Stichprobenumfänge erfasst, die eine statistisch sinnvolle Auswertung zulassen. Erfahrungsgemäß beginnt der Mittelwert über die Fahrzeugschicht ab ca. 30 Messwerten zu konvergieren, besser sollten aber mindestens 100 Messwerte gemittelt werden, um eine verlässliche Aussage treffen zu können (vgl. (Chen, Zhang, and Borken-Kleefeld 2019)). Unabhängig davon wurden in den Abbildungen in Anhang 2 der Vollständigkeit halber alle erfassten Messwerte aufgezeigt.

Demnach zeigt sich bei  $\text{NO}_x$  die bei den PKW beschriebene Tendenz der Grenzwertüberschreitungen auch bei den anderen Fahrzeugkategorien. Bei der Schadstoffkomponente CO liegen die Realemissionen der älteren Emissionskonzepte tendenziell um den Faktor 2 bis

3 über Neuzulassungs-Grenzwerten, was dem Verschleiß geschuldet sein dürfte. Bei PM10 liegen die Realemissionen aller Fahrzeugkategorien tendenziell im Bereich der Grenzwerte.



**Abb. 3-3: Vergleich NO<sub>x</sub>: RSD-Messung / Grenzwert Typzulassung PKW Benzin**



**Abb. 3-4: Vergleich NO<sub>x</sub>: RSD-Messung / Grenzwert Typzulassung PKW Diesel**

### **3.3 Vergleich fahrzeugspezifischer PKW-Emissionsfaktoren mit Emissionsfaktoren nach HBEFA**

#### **3.3.1 Emissionsfaktoren in PHEM**

Ein Ziel des Projektes war der Vergleich der RSD-Messdaten mit den Emissionsfaktoren des HBEFA. Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, ist jedoch ein Vergleich der instantanen Emissionsraten, die bei den RSD-Messungen für den momentanen Fahrzustand erfasst werden, mit den mittleren Zyklusemissionsfaktoren der HBEFA-Verkehrssituationen nicht sinnvoll. Deshalb erfolgte der Vergleich auf Basis der leistungsspezifischen Emissionsraten des dem HBEFA zu Grunde liegenden "Passenger car and heavy duty Emission Model" (PHEM)<sup>4</sup>. Der Vergleich bezog sich dabei auf die Stickoxidemissionsfaktoren der Benzin- und Diesel-PKW.

In PHEM sind fahrzeugspezifische Emissionskennfelder implementiert, mittels derer, in Abhängigkeit von der momentan aufgewendeten Motorleistung sowie der Motordrehzahl, sekundenfein Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen berechnet werden können. Leistung und Drehzahl werden dabei - unter Verwendung eines programminternen Schaltmodells sowie fahrzeugspezifischer relevanter technischer Parameter wie Fahrzeuggewicht, Motornennleistung oder Luftwiderstand – fahrzeugspezifisch für jeden beliebigen Fahrzyklus berechnet. Die fahrzeugspezifische effektive Leistung berechnet sich dabei durch Summation aus den Leistungskomponenten zur Überwindung des Luftwiderstandes, des Rollwiderstandes, des Beschleunigungswiderstandes sowie der Streckenlängsneigung. Da die aufzuwendende Leistung in einem bestimmten Betriebszustand v.a. von der Fahrzeugmasse abhängt, unterscheiden sich diese zwischen den Emissionskonzepten - entsprechend den in PHEM jeweils angenommenen Fahrzeugmassen. Die Streckenlängsneigung betrug an den beiden Untersuchungsquerschnitten circa +0.5 %.

Mit PHEM wurden auch die Emissionsfaktoren in HBEFA basierend auf den darin enthaltenen repräsentativen Fahrkurven der einzelnen Verkehrssituationen berechnet. In HBEFA werden jedoch lediglich die mittleren Zyklusemissionen, nicht aber die sekundenfeinen Emissionen ausgewiesen.

---

<sup>4</sup> PHEM 13.0.3.20, Version für HBEFA 4.1

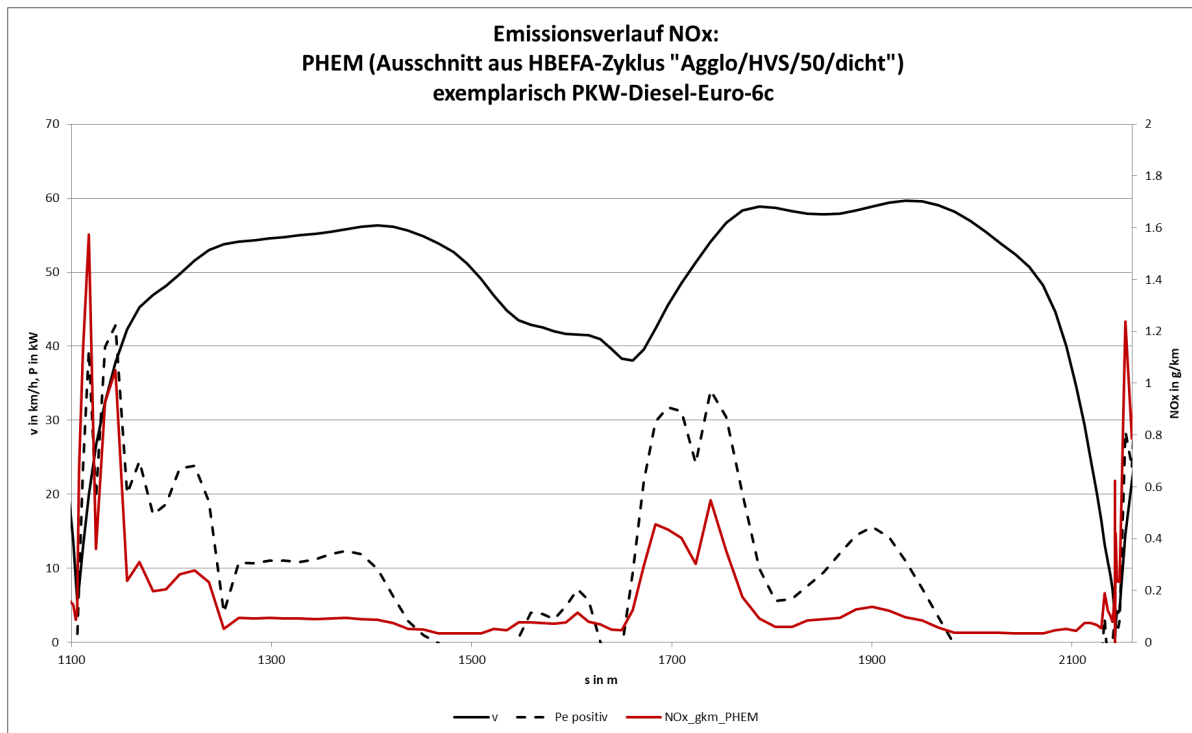
Für den Vergleich der RSD-Messungen mit HBEFA bzw. PHEM wurden deshalb mit PHEM alle PKW-Fahrzyklen der in **Tab. 3-6** dargestellten Verkehrssituationen jeweils in den level-of-service des Verkehrsflusses (LOS) „flüssig“, „dicht“, „gesättigt“, „stop&Go“ sowie „stop&Go2“ berechnet und als Sekundenwerte exportiert.

**Tab. 3-6: Innerortsverkehrssituationen nach HBEFA 4.1**

Gebiet/Straßentyp	Tempolimit				
	30	40	50	60	70
Agglo/AB-City				x	x
Agglo/Erschließungsstraße	x	x	x		
Agglo/FernStr-City			x	x	x
Agglo/FernStr-Nat.					x
Agglo/Hauptverkehrsstraße	x	x	x	x	x
Agglo/Sammelstraße	x	x	x	x	

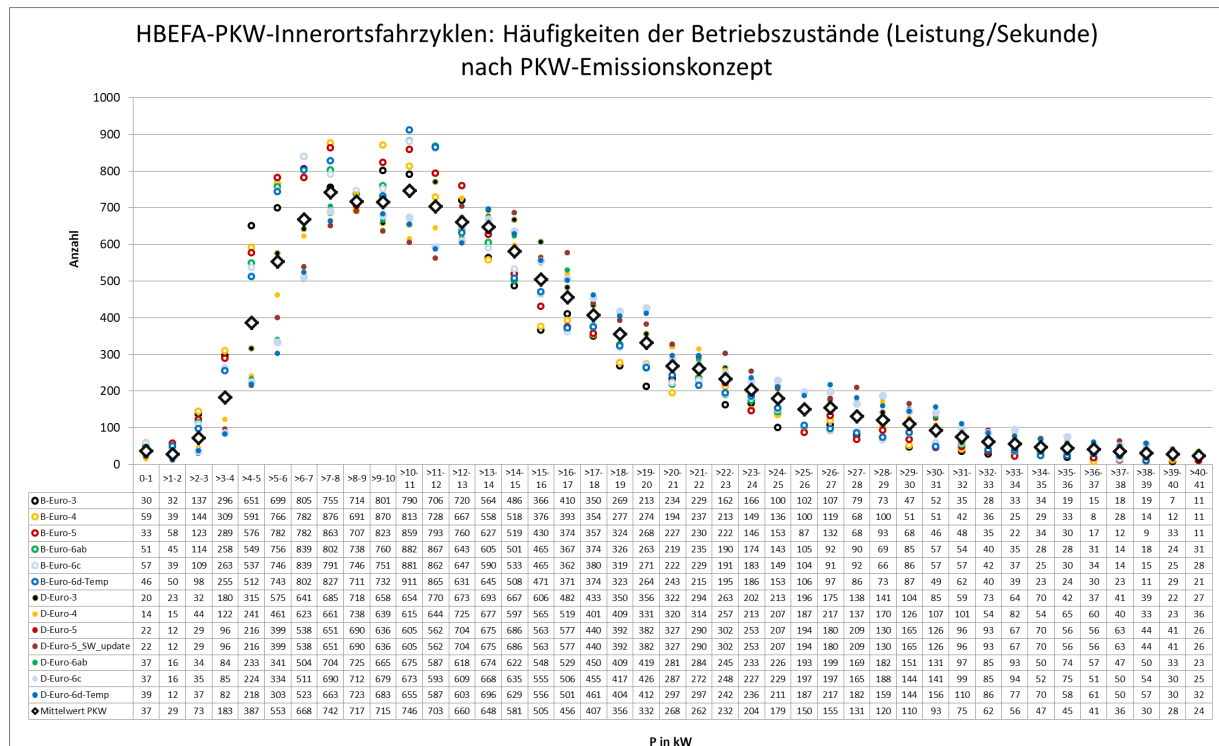
Die Gesamtheit dieser insgesamt 90 Fahrzyklen umfasste ca. 66 500 Sekundenwerte, die ein umfassendes Spektrum der im Innerortsverkehr auftretenden Verkehrszustände abdecken. Beim Export der Sekundenwerte wird in PHEM neben den Emissionsraten u.a. auch die aufgewendete Motorleistung ausgewiesen. In **Abb. 3-5** ist dies am Beispiel der NO<sub>x</sub>-Emissionen eines Diesel-Euro-6c-PKW für einen Ausschnitt des HBEFA 4.1-Zyklus der Verkehrssituation „Agglo/HVS/50/dicht“ dargestellt.





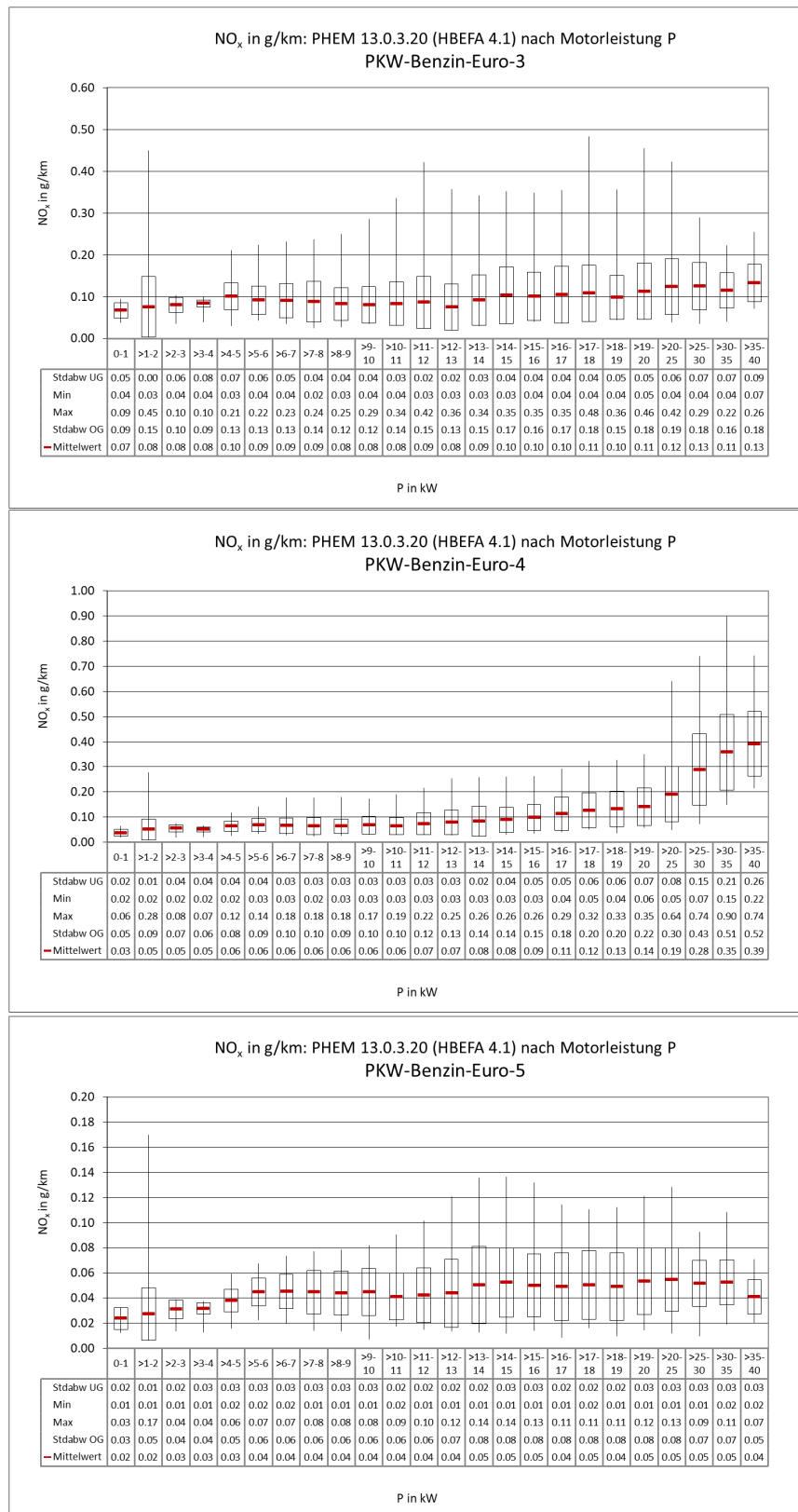
**Abb. 3-5: Emissionsverlauf NO<sub>x</sub> - exemplarisch PKW-Diesel-Euro-6c**

Auf der Grundlage der sekundenfeinen NO<sub>x</sub>-Emissionen sowie der entsprechenden Leistungen wurden für jedes Emissionskonzept mittlere NO<sub>x</sub>-Emissionen für ein ganzzahliges Leistungsintervall im Bereich von 0 – 40 kW berechnet. In **Abb. 3-6** ist die Verteilung der Betriebszustände nach Leistungsintervallen für die PKW-Fahrzyklen der HBEFA-Innerortsverkehrssituationen dargestellt. Demnach liegen ca. 75 % der sekundenfeinen Betriebszustände im Bereich zwischen 5 und 20 kW.



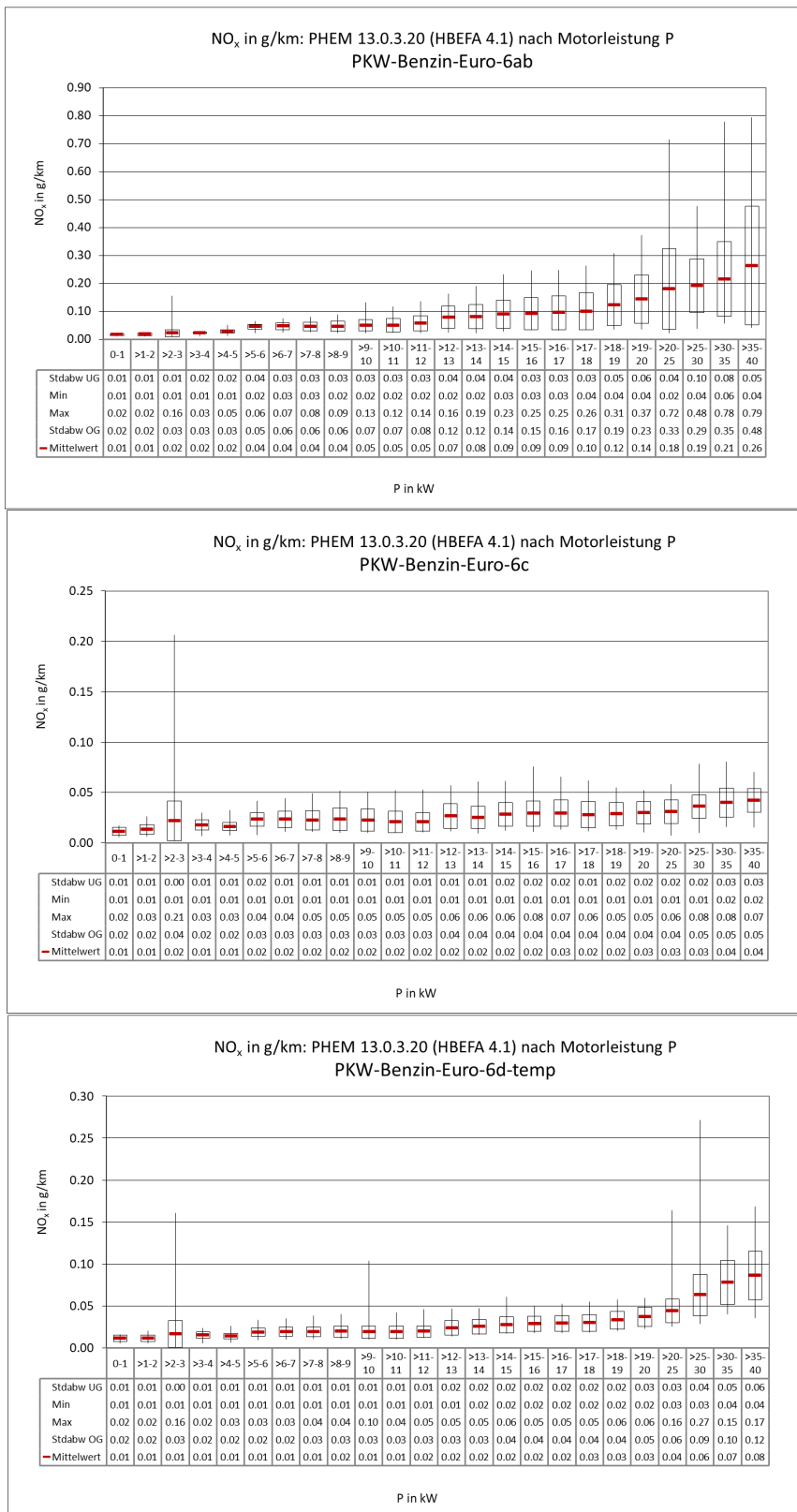
**Abb. 3-6: HBEFA-PKW-Innerortsfahrzyklen: Häufigkeiten der Betriebszustände (Leistung/Sekunde) nach PKW-Emissionskonzept**

In den **Abb. 3-7** bis **Abb. 3-10** sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren der HBEFA 4.1-Innerortsfahrzyklen in g/km für die PKW-Emissionskonzepte Euro-3 –Euro 6d-TEMP der Antriebsarten Benzin und Diesel dargestellt. Da die Emissionen in den Emissionskennfeldern PHEM auf Basis der momentanen Leistung und Drehzahl berechnet werden, streuen die Emissionsfaktoren bei gleicher Leistung in Abhängigkeit von der Gangwahl, die in PHEM im jeweiligen Betriebszustand angenommen wird. Für die Auswertung wurde auf Grund der subjektiven Beobachtungen sowie der erfassten Geschwindigkeiten angenommen, dass sämtlichen Fahrten im 2., 3. oder 4. Gang erfolgten. Die in **Abb. 3-11** dargestellten Mittelwerte zeigen, dass die  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei allen betrachteten PKW-Emissionskonzepten mit zunehmender Leistung ansteigen.



**Abb. 3-7: NO<sub>x</sub> in g/km: PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) nach Motorleistung P: PKW-Benzin Euro 3 bis Euro 5**

Ermittlung der Emissionen von Kraftfahrzeugen im fließenden Verkehr mit Remote Sensing Detection (EMI-RSD)



**Abb. 3-8: NO<sub>x</sub> in g/km: PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) nach Motorleistung P: PKW-Benzin Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP**

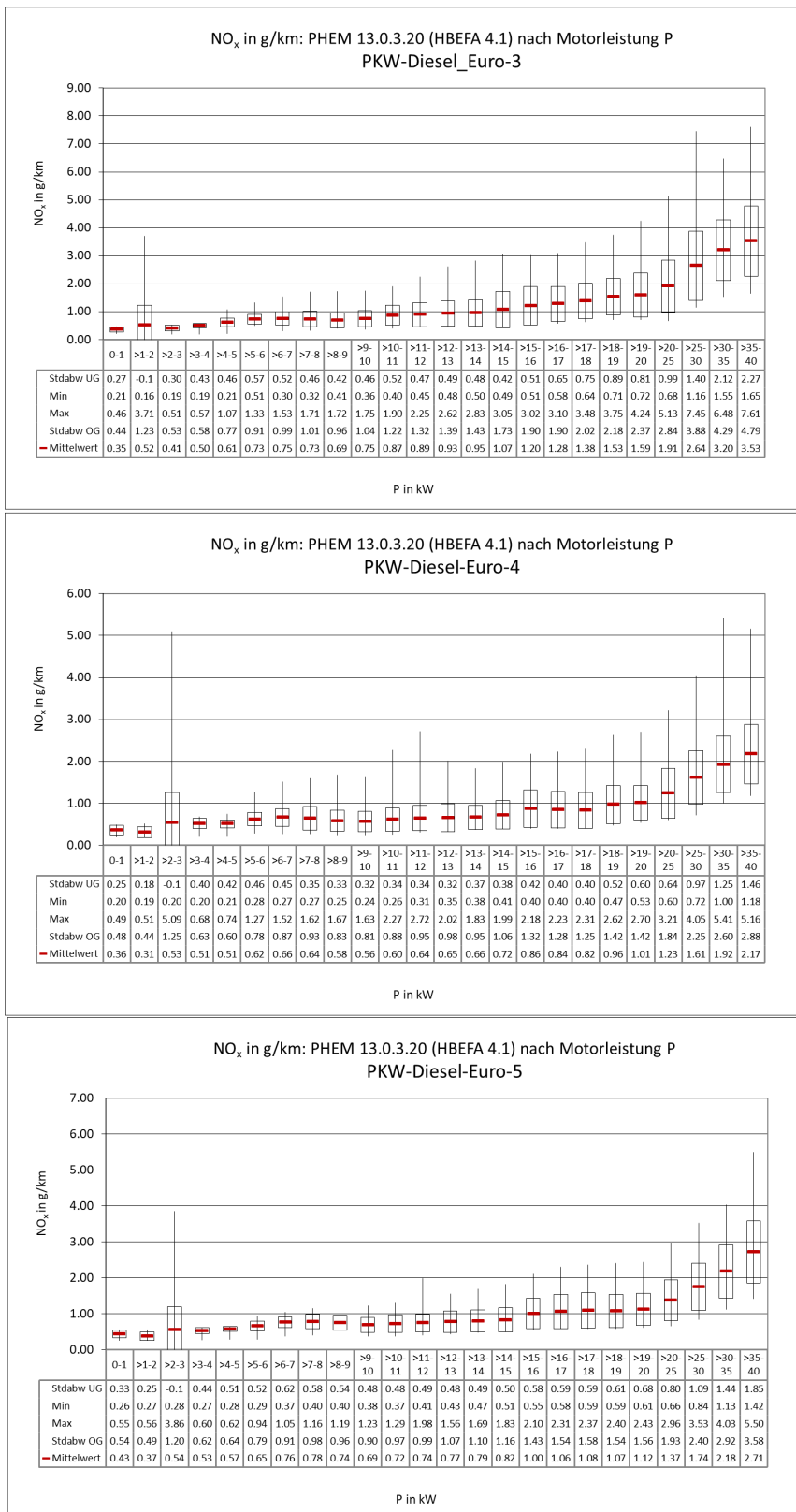
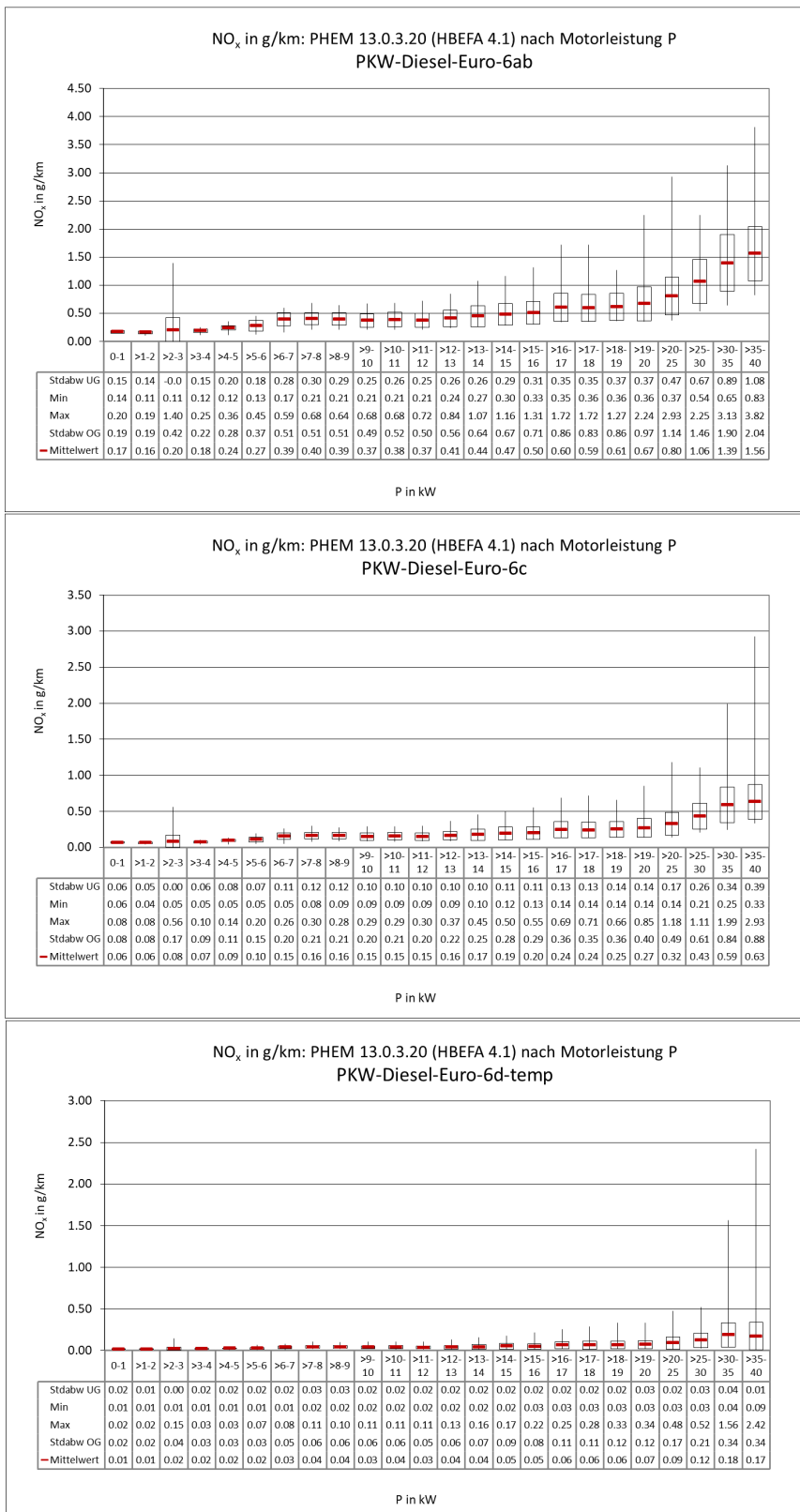
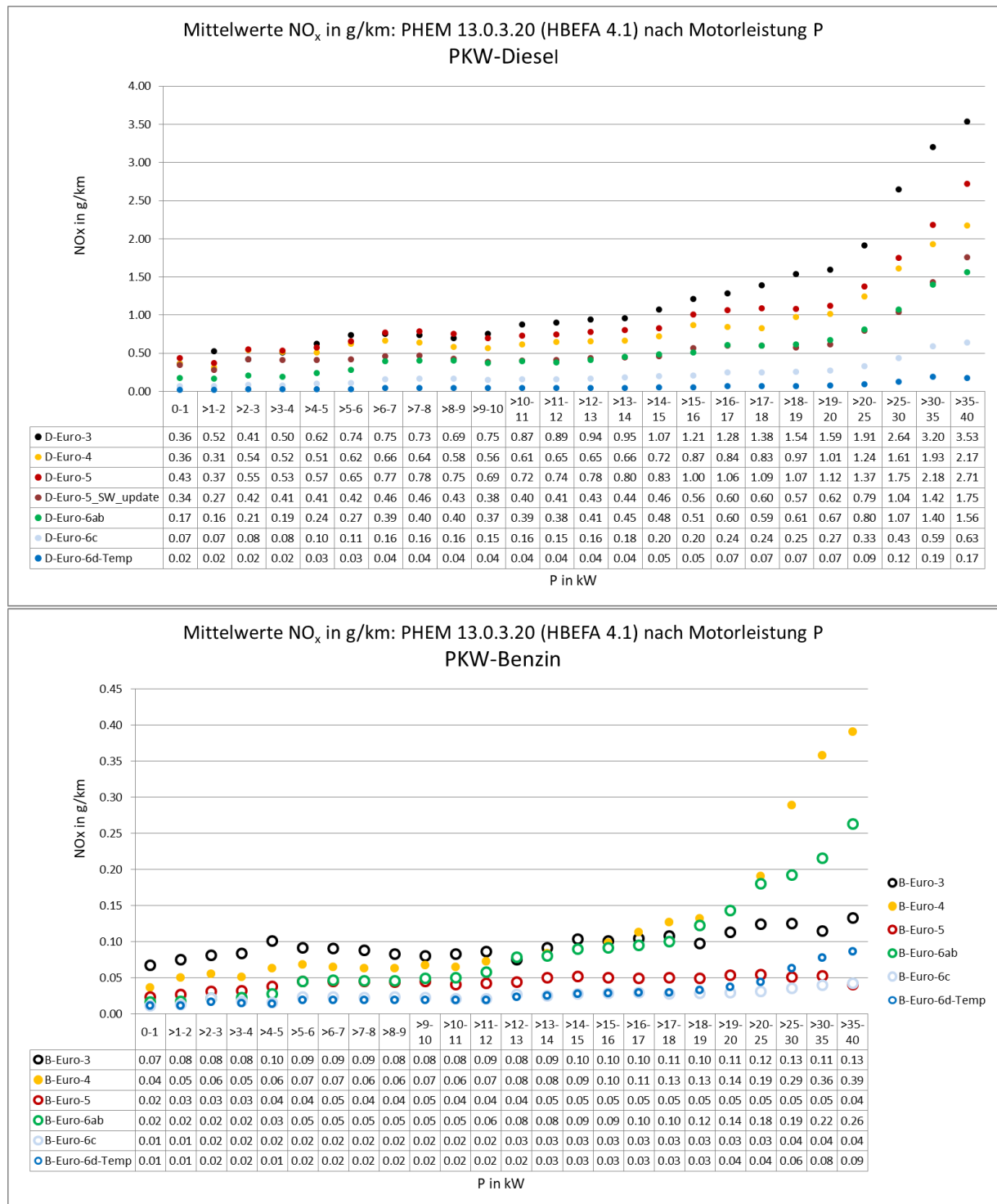


Abb. 3-9: NO<sub>x</sub> in g/km: PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) nach Motorleistung P: PKW-Diesel Euro 3 bis Euro 5



**Abb. 3-10: NO<sub>x</sub> in g/km: PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) nach Motorleistung P: PKW-Diesel Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP**



**Abb. 3-11: Mittelwerte NO<sub>x</sub> in g/km: PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) nach Motorleistung P PKW-Diesel (oben) und Benzin (unten)**

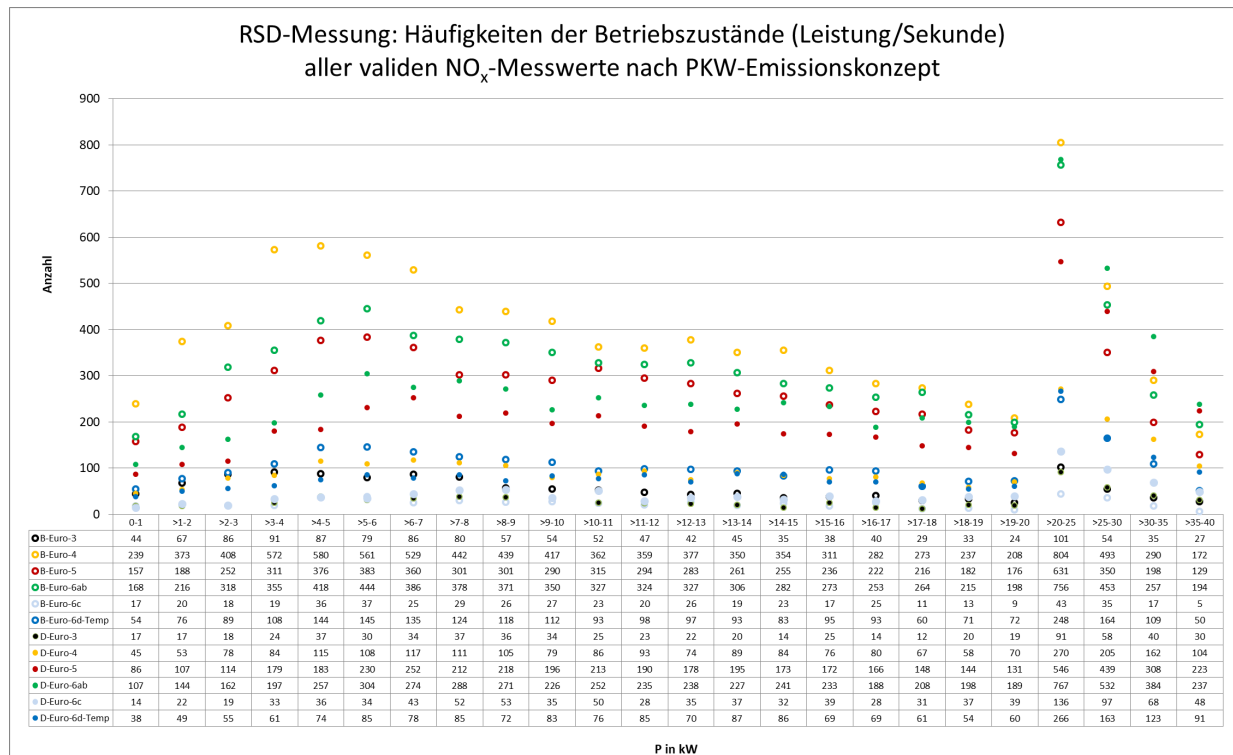
### 3.3.2 Emissionsfaktoren aus RSD-Messungen

Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, erfolgte der Vergleich zwischen den RSD-Messungen und den Emissionsfaktoren des HBEFA 4.1 bzw. dem darin zu Grunde liegenden PHEM auf Basis der aufgetragenen Motorleistung. In PHEM wird diese sekundenfein berechnet und beim Export der sekundenfeinen Emissionen ausgewiesen. Bei den RSD-Messungen wurden neben den Schadstoffkonzentrationswerten auch die Kinematikparameter Geschwindigkeit und Beschleunigung erfasst. Über die aus der Kennzeichenerfassung ermittelten fahrzeugspezifischen Massen erfolgte eine Berechnung der Motorleistung analog zum Berechnungsalgorithmus in PHEM.

Die umgerechneten instantanen  $\text{NO}_x$  Emissionsraten (nur gültige Messungen), werden nach der abgeschätzten Motorleistung aufgegliedert. Die Häufigkeitsverteilung im Leistungsspektrum 0 bis 40 kW ist in **Abb. 3-12** dargestellt. Bei den meisten Emissionskonzepten liegen genügend Messwerte je Leistungspunkt vor; nur bei Euro-3- und Euro-6c-Fahrzeugen sind die Anzahlen der erfassten, validen Messwerte für einen belastbaren Vergleich relativ gering (< 50 je Leistungsklasse).

In den **Abb. 3-13** bis **Abb. 3-16** sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren der RSD-Messungen in g/km für die PKW-Emissionskonzepte Euro 3 bis Euro 6d-TEMP der Antriebsarten Benzin und Diesel dargestellt. Die in **Abb. 3-17** dargestellten Mittelwerte zeigen, dass die  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei allen betrachteten PKW-Emissionskonzepten mit zunehmender Leistung ansteigen.





**Abb. 3-12: RSD-Messung: Häufigkeiten der Betriebszustände (Leistung/Sekunde) aller validen NO<sub>x</sub>-Messwerte nach PKW-Emissionskonzept. Von 0 bis 20 kW in Stufen von 1 kW, darüber hinaus in Stufen von 5 kW.**

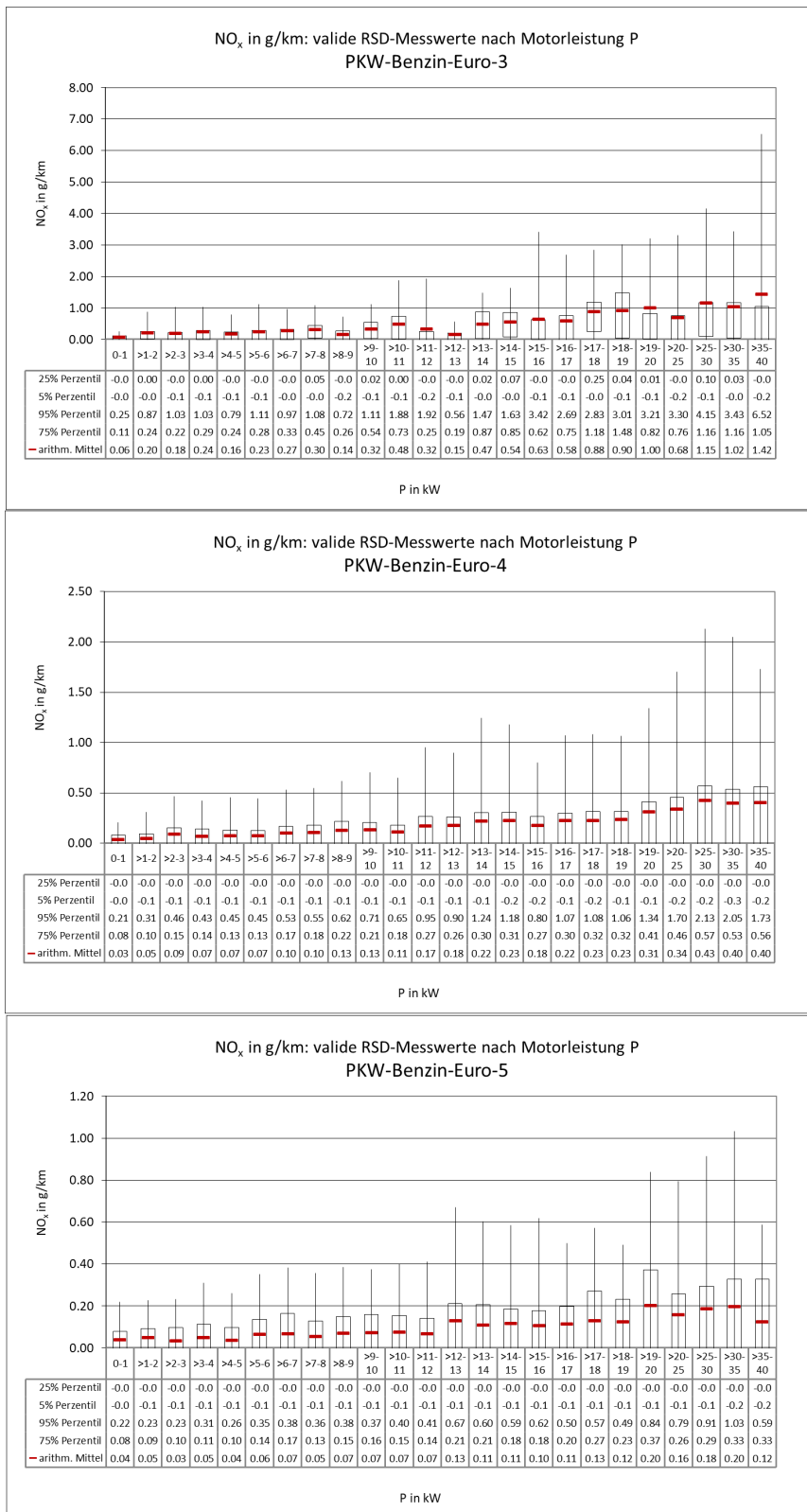
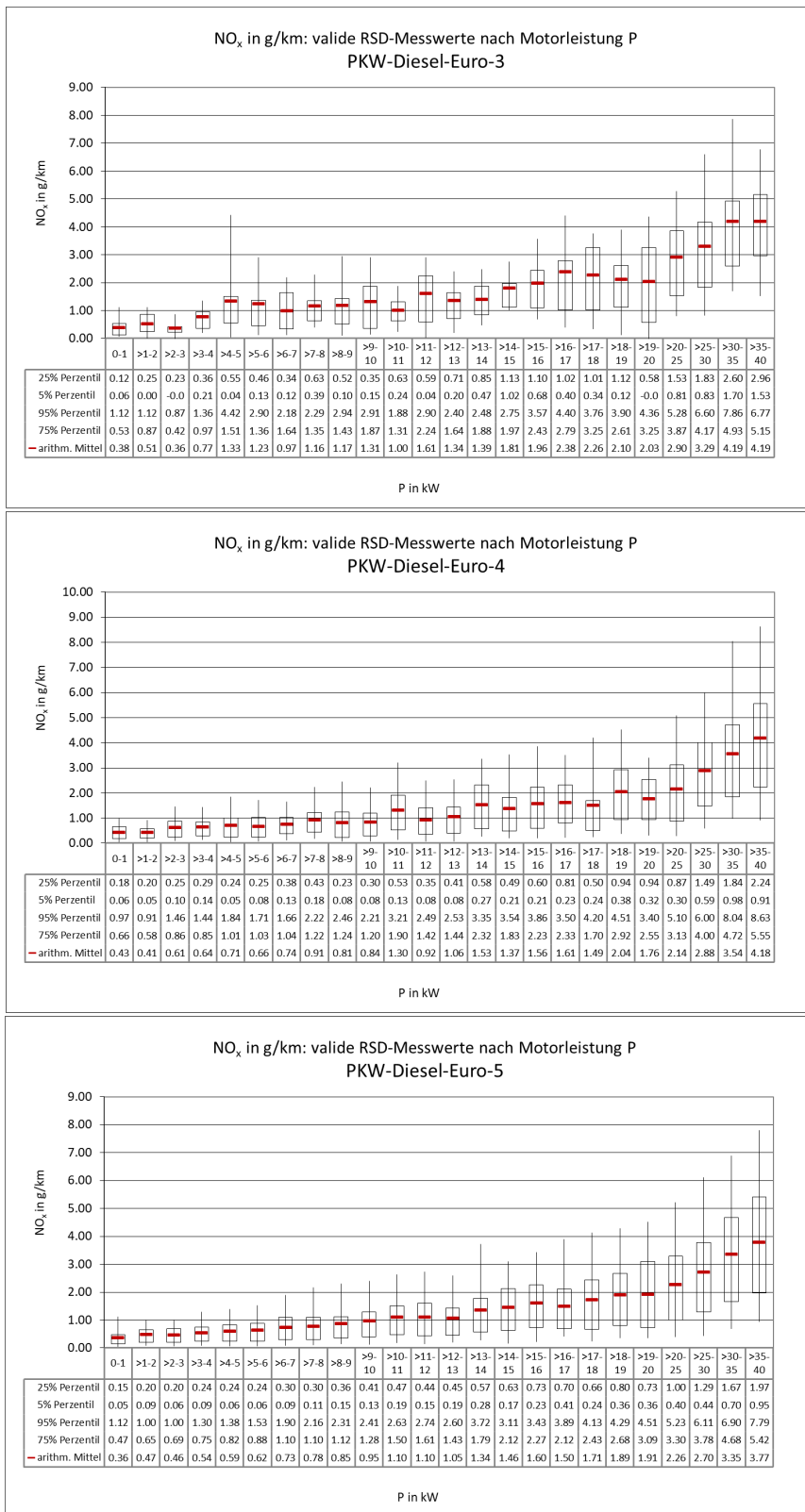
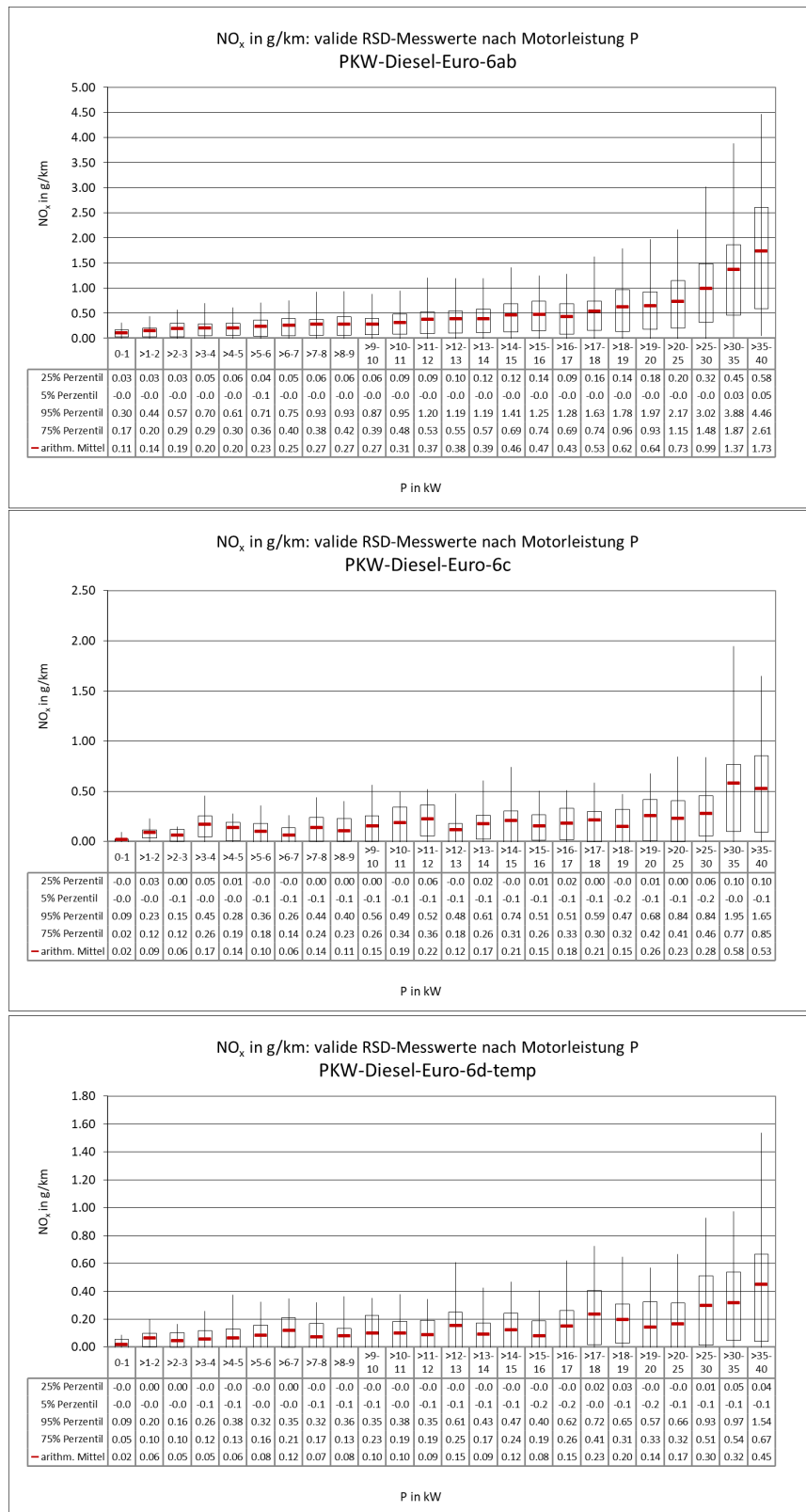


Abb. 3-13: NO<sub>x</sub> in g/km: valide RSD-Messwerte nach Motorleistung P: PKW-Benzin Euro 3 bis Euro 5

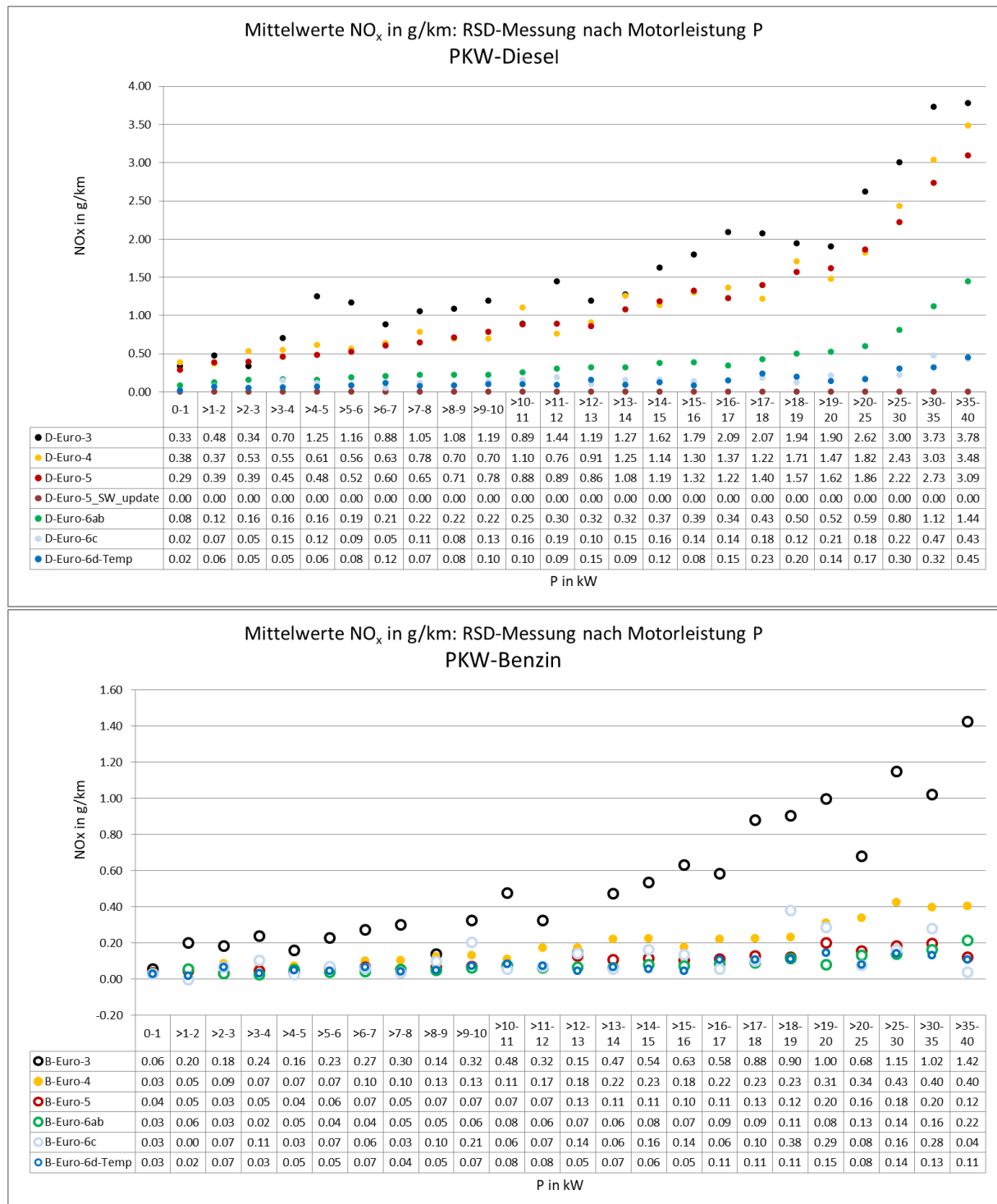




**Abb. 3-15: NO<sub>x</sub> in g/km: valide RSD-Messwerte nach Motorleistung P: PKW-Diesel Euro 3 bis Euro 5**



**Abb. 3-16: NO<sub>x</sub> in g/km: valide RSD-Messwerte nach Motorleistung P: PKW-Diesel Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP**



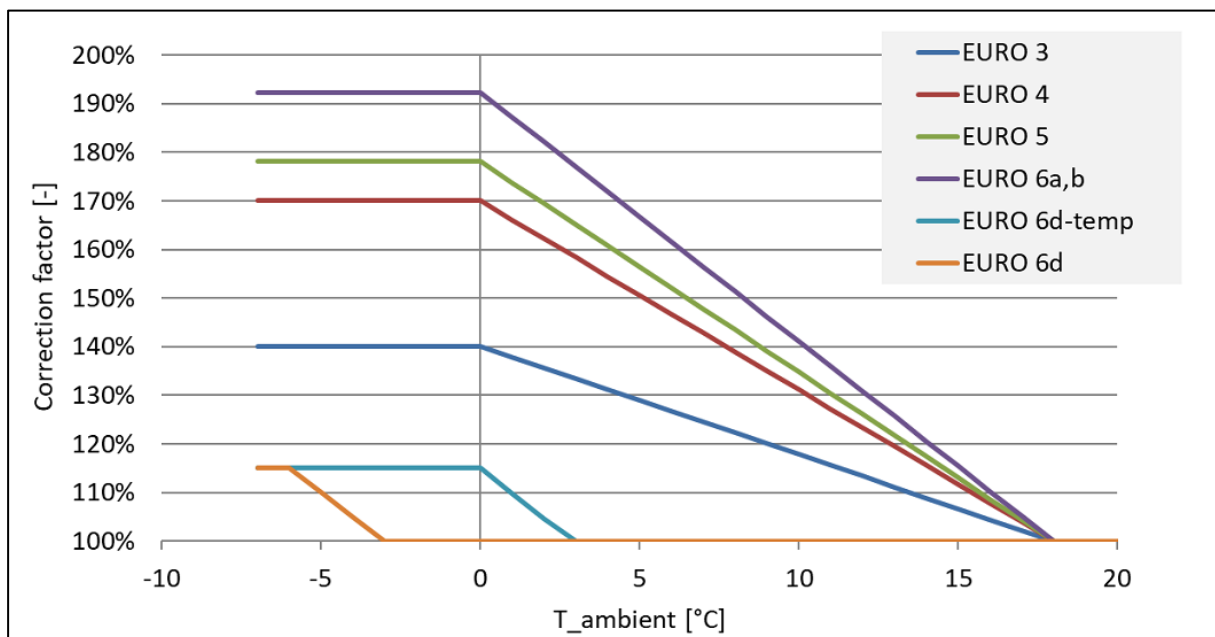
**Abb. 3-17: Mittelwerte NO<sub>x</sub> in g/km: RSD-Messung nach Motorleistung P: PKW-Diesel (oben) und Benzin (unten)**

### 3.3.3 Vergleich PKW-NO<sub>x</sub>-Emissionen PHEM / RSD

Die Emissionskennfelder in PHEM beziehen sich ausschließlich auf Emissionen im warmen Betriebszustand. Kaltstart- oder Verdunstungsemissionen werden in PHEM nicht berechnet.

Weiterhin erfolgt die Berechnung der warmen Emissionen ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses, d. h. mit PHEM werden sog. Basisemissionsfaktoren berechnet, die für Diesel-PKW-Euro-3 bis Euro-6 nur für Temperaturen über 20°C repräsentativ sind. Bei den übrigen Emissionskonzepten wird in HBEFA der Temperatureinfluss als nicht relevant betrachtet, sodass dort die Basisemissionsfaktoren unabhängig von der Umgebungstemperatur unverändert bleiben.

Der Temperatureinfluss wird im HBEFA 4.1 für die o. g. Emissionskonzepte durch Korrekturfaktoren berücksichtigt, mittels derer die Stickoxidemissionsfaktoren – ausgehend von den Basisemissionsfaktoren – erhöht werden, wenn die Außentemperatur von 20°C auf 0°C zurückgeht (siehe **Abb. 3-18**).



**Abb. 3-18: Funktion zur Berücksichtigung des Einflusses Umgebungstemperatur auf die Höhe der Stickoxid-Emissionsfaktoren der Diesel-PKW Euro 3 bis Euro 6<sup>5</sup>**

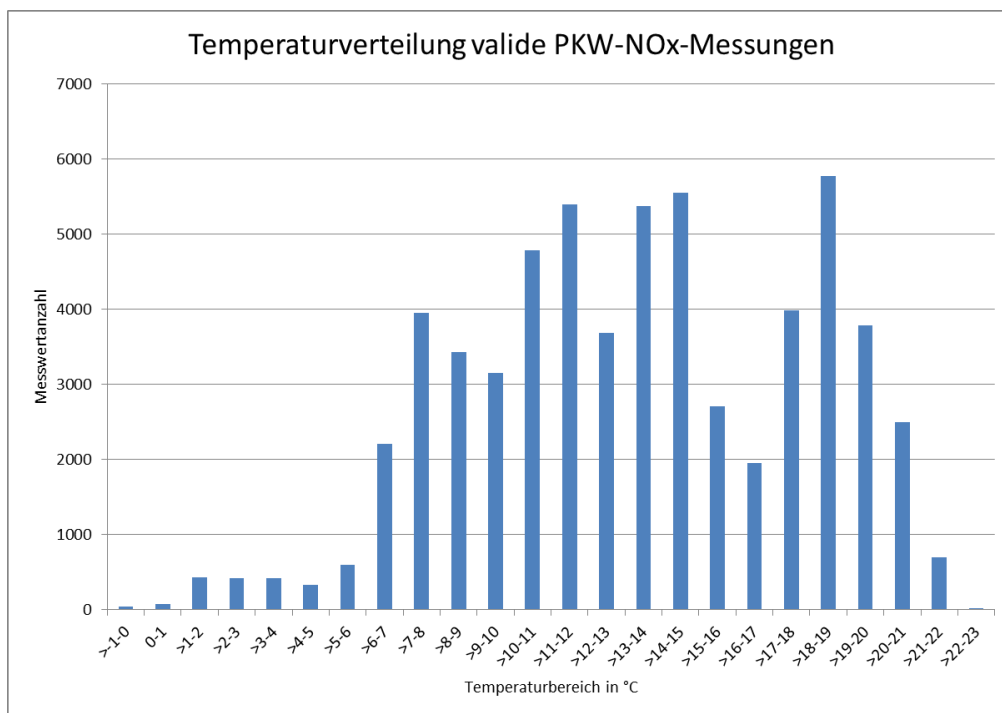
<sup>5</sup> [https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA41\\_Report\\_TUG\\_09092019.pdf](https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA41_Report_TUG_09092019.pdf)

Aus den Regressionsfunktionen ergeben sich die in **Tab. 3-7** dargestellten Koeffizienten.

**Tab. 3-7: Koeffizienten der Funktionen zur Berechnung der Korrekturfaktoren**

Korrekturfaktor: $K_f = a \cdot T_{VTg} + b$		
Emissionskonzept PHEM	a	b
PKW D-Euro 3	-0.022	1.4
PKW D-Euro 4	-0.039	1.7
PKW D-Euro 5	-0.044	1.79
PKW D-Euro 6a, b, c	-0.051	1.92
PKW D-Euro 6d-TEMP	-0.050	1.15

Die RSD-Messungen erfolgten im Herbst 2019; die Temperaturen lagen während der Messungen größtenteils unter 20 °C (siehe **Abb. 3-19**).



**Abb. 3-19: Temperaturverteilung valide PKW-NO<sub>x</sub>-Messungen**

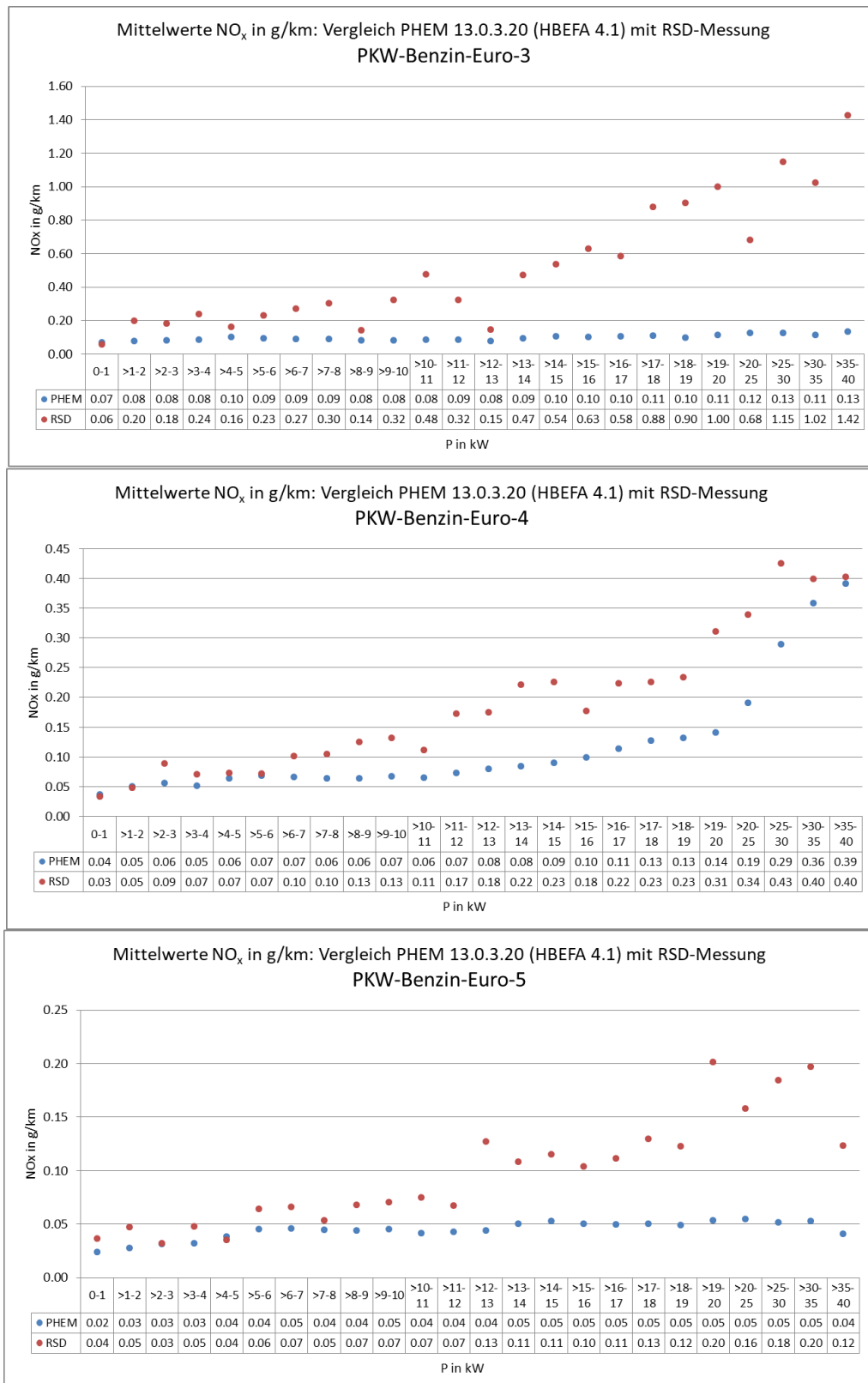
Für den Vergleich der auf 20°C bezogenen Emissionsfaktoren aus PHEM mit den Daten der RSD-Messungen wurden die RSD-Messdaten für die betreffenden Emissionskonzepte mit den in **Tab. 3-7** dargestellten Korrekturfaktoren auf 20°C normiert.



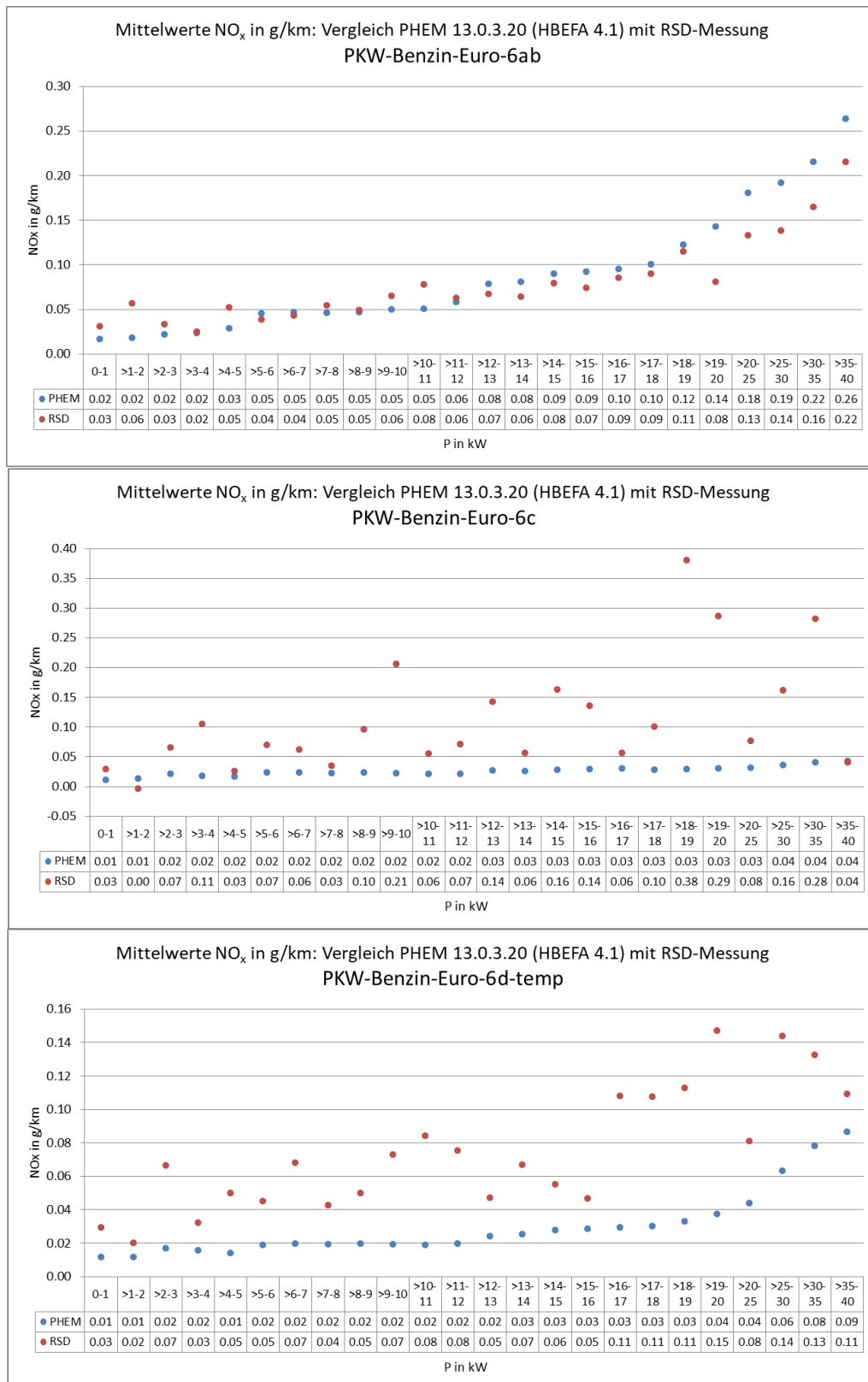
In **Abb. 3-20** bis **Abb. 3-23** sind die Mittelwerte der PKW-NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren in g/km aus PHEM mit denen aus den RSD-Messungen (Realtemperatur sowie normiert auf 20°C) auf Basis der Leistungen vergleichend gegenübergestellt. Demnach liegen die Emissionsfaktoren der RSD-Messungen bei fast allen Emissionskonzepten und Leistungsintervallen tendenziell über denen der PHEM-Emissionen; bei Diesel Euro 6ab und 6c sowie Benzin Euro 6ab ist PHEM tendenziell höher.

In HBEFA 4.1 werden innerhalb der Diesel-Euro-5-PKW explizit Fahrzeuge als Fahrzeugschicht ausgewiesen, die mit einem EA-189-Motor ausgerüstet und damit vom „VW-Abgas-Skandal“ betroffen sind. Die Emissionsfaktoren für diese Schichten werden sowohl für den Zustand vor als auch nach dem Software-Update ausgewiesen. Der Anteil der Fahrzeugschichten mit EA-189-Motoren wird in HBEFA 4.1 innerhalb des Diesel-Euro-5-Konzeptes mit ca. 39 % angenommen. In den Rücklaufdaten der Zulassungsstellen aus der Kennzeichenerfassung lagen jedoch keine eindeutigen Informationen für eine diesbezügliche Unterscheidung vor, d.h. weder dazu, ob ein Fahrzeug mit einem EA-189-Motor ausgerüstet ist, noch ob ggf. ein Software-Update vorgenommen wurde.

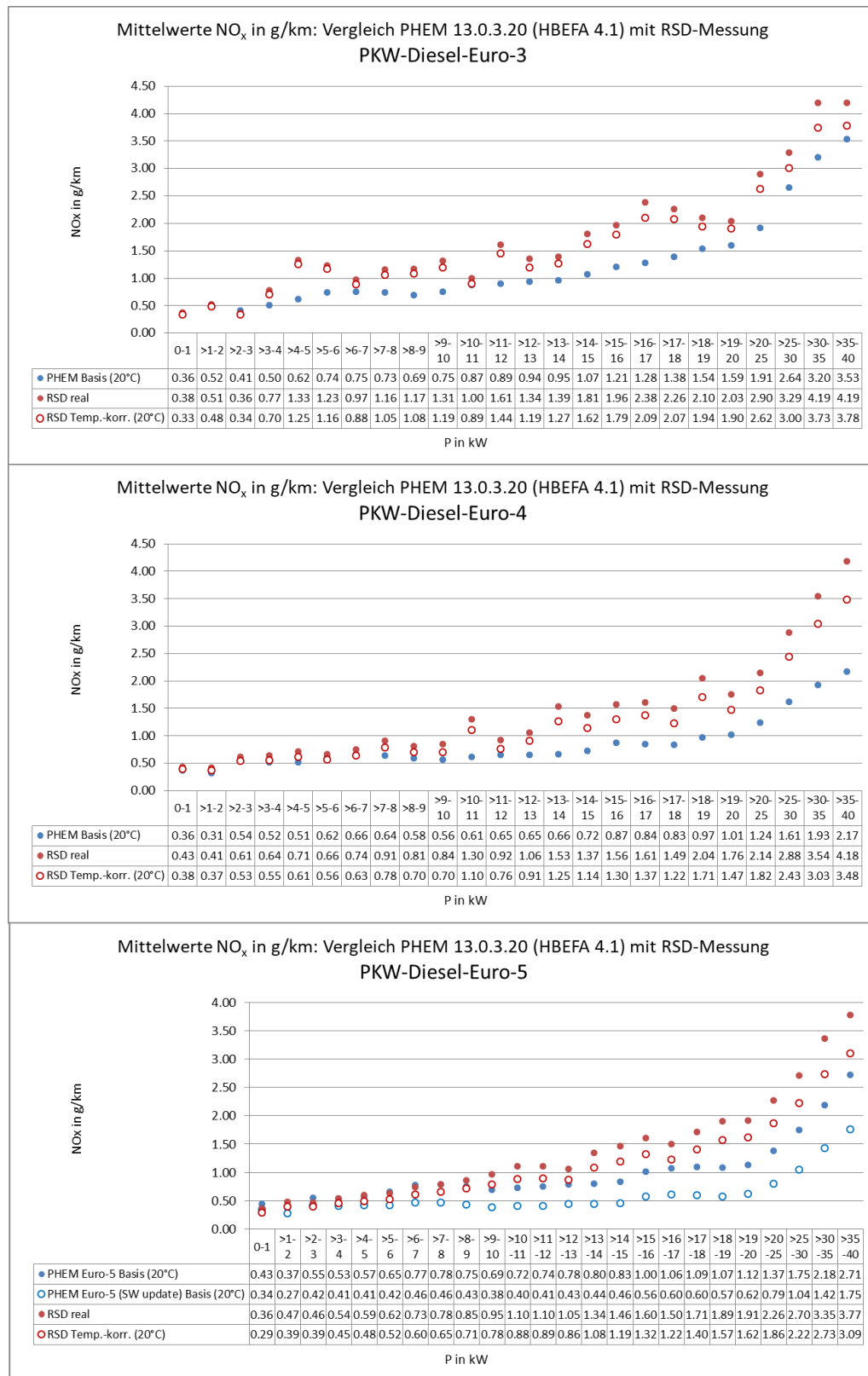
Die RSD-Messwerte liegen bei den Diesel-Euro-5-PKW in allen Leistungsintervallen über den PHEM-Emissionen – sowohl über denen der Fahrzeuge, die nicht mit einem EA 189 Motor ausgestattet sind als auch – noch stärker – über denen der EA 189-Fahrzeuge nach Software-Update.



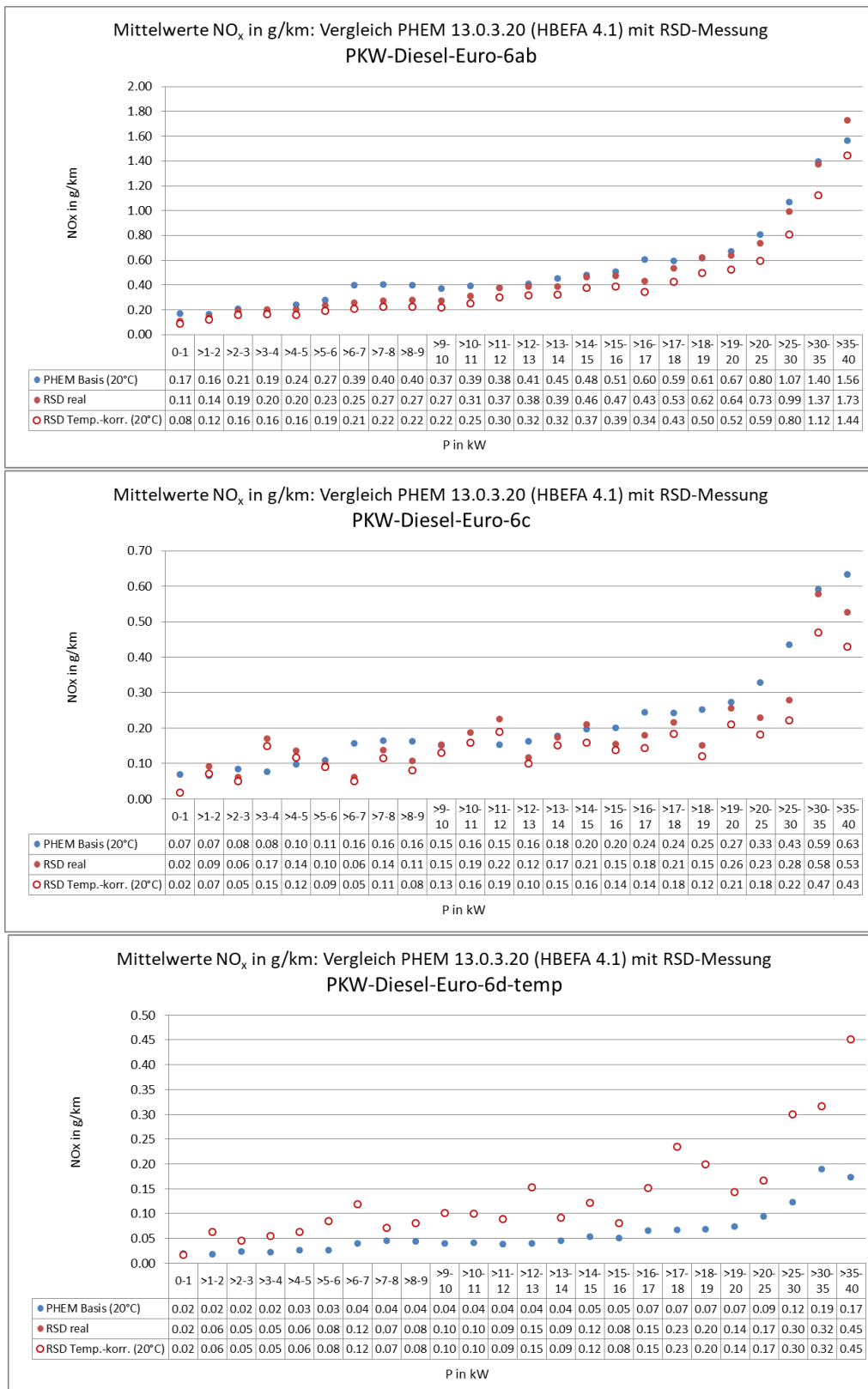
**Abb. 3-20: Mittelwerte NO<sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) mit RSD-Messung: PKW-Benzin Euro 3 bis Euro 5**



**Abb. 3-21: Mittelwerte NO<sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) mit RSD-Messung: PKW-Benzin Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP**



**Abb. 3-22: Mittelwerte NO<sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) mit RSD-Messung: PKW-Diesel Euro 3 bis Euro 5**



**Abb. 3-23: Mittelwerte NO<sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) mit RSD-Messung: PKW-Diesel Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP**

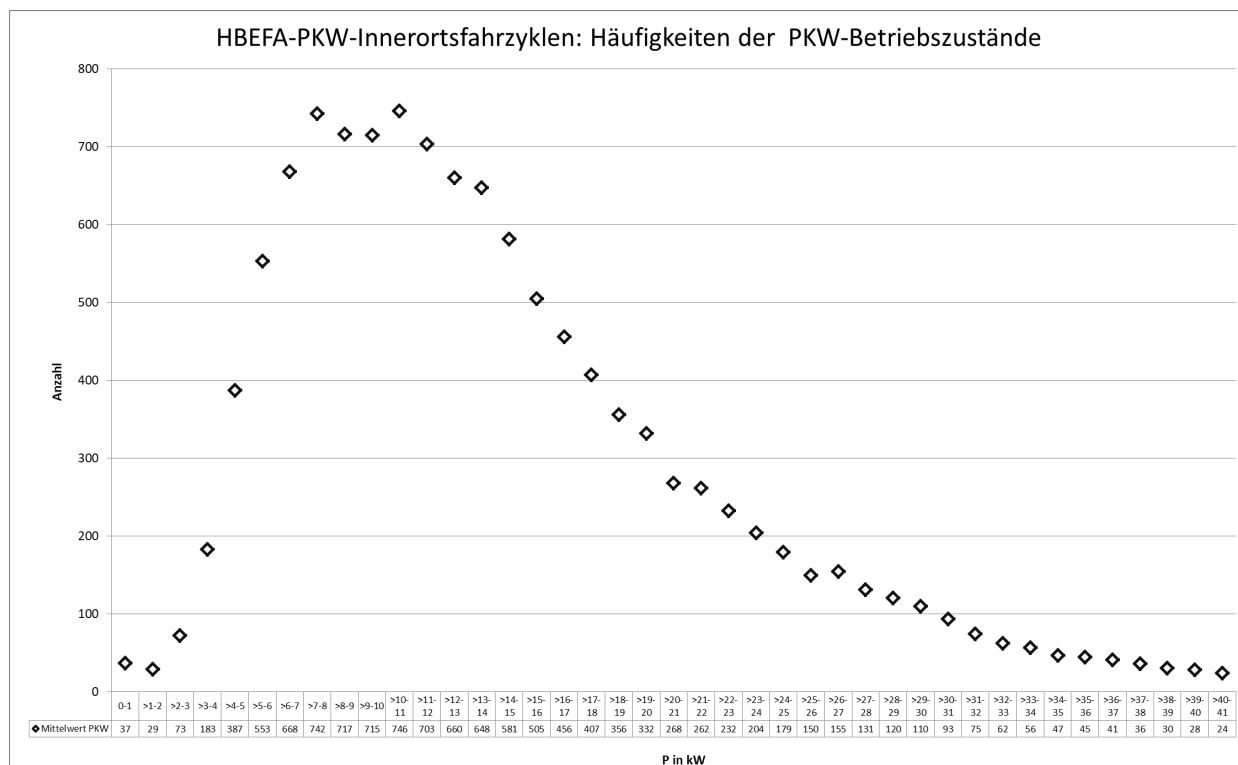
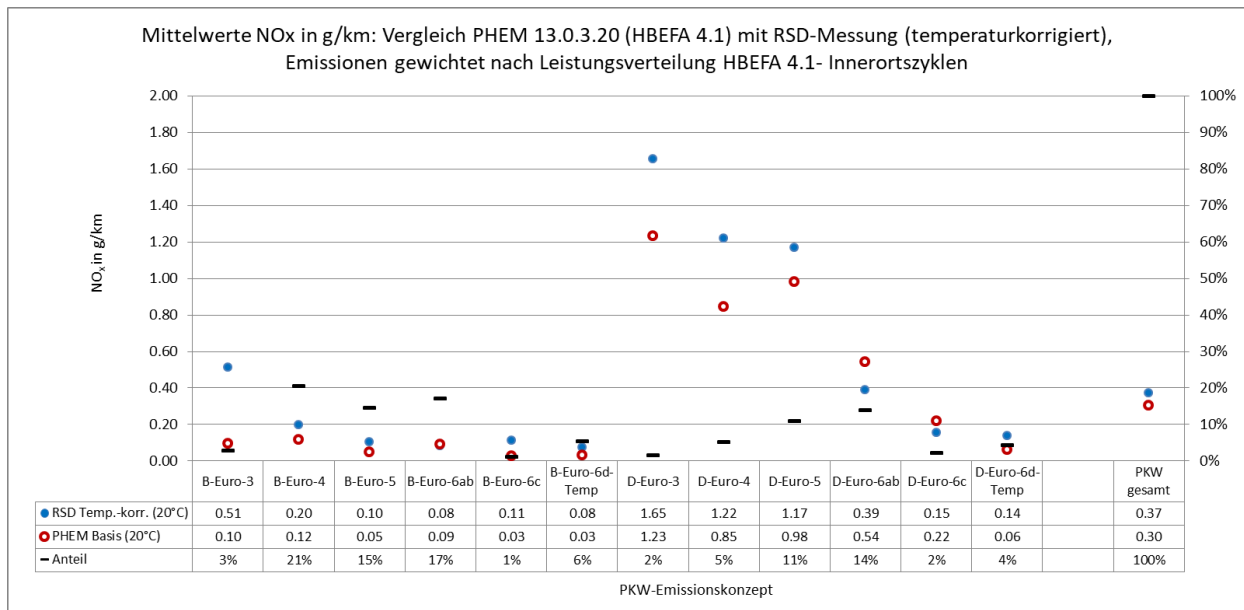


Abb. 3-24: HBEFA-PKW-Innerortsfahrzyklen: Häufigkeiten der PKW-Betriebszustände

Für eine integrative Betrachtung der Emissionen über alle relevanten Leistungsintervalle erfolgte eine Wichtung der leistungsspezifischen Emissionen mit der in **Abb. 3-24** dargestellten mittleren PKW-Leistungsverteilungen der HBEFA 4.1-Fahrzyklen.

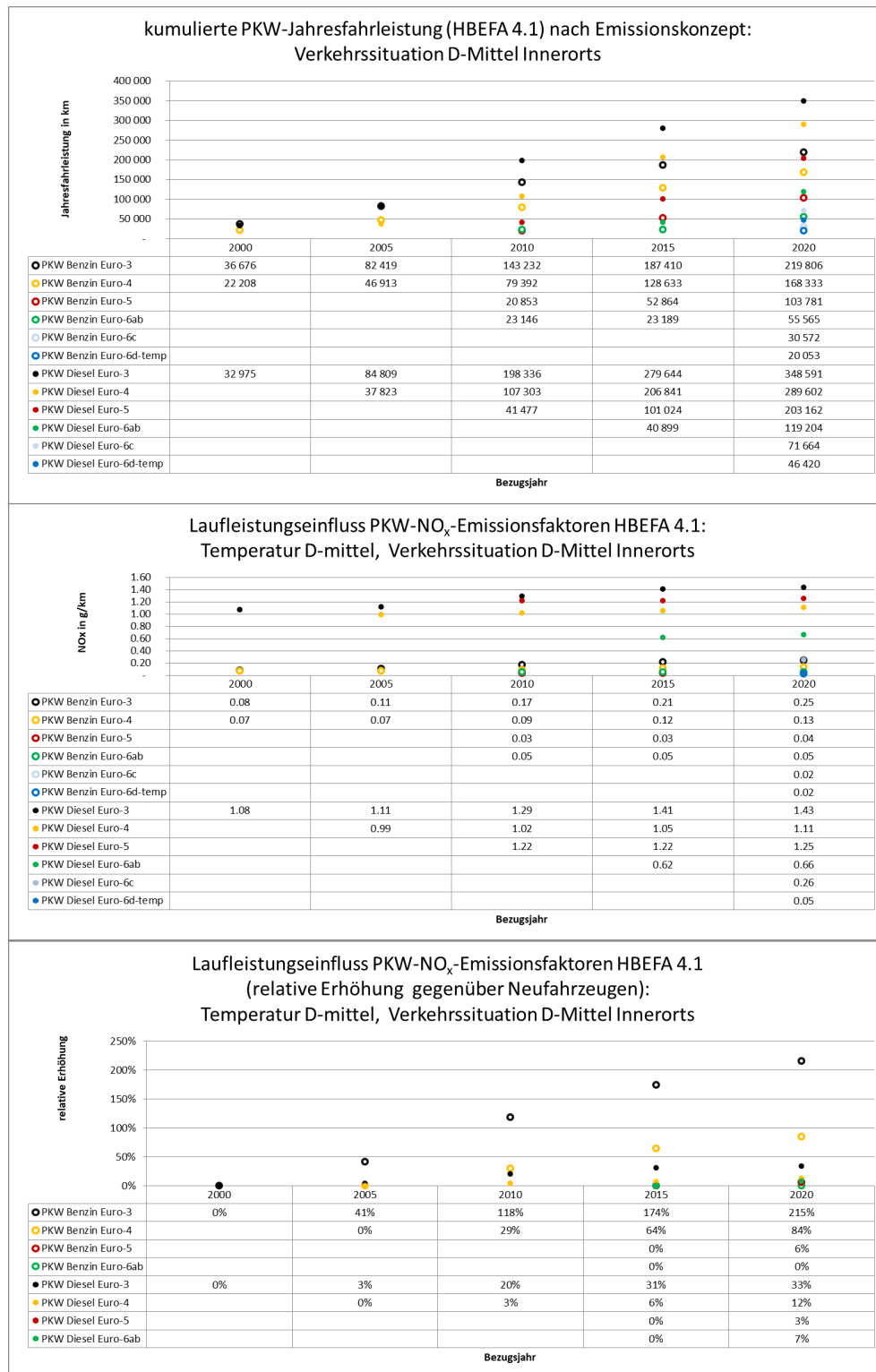
Demnach liegen die temperaturkorrigierten PKW-NO<sub>x</sub>-Emissionen der Emissionskonzepte (Euro 3 bis Euro 5) sowohl bei den Benzin- als auch bei den Diesel-PKW in den RSD-Messungen tendenziell über denen der PHEM-Emissionskennfelder. Bei den Emissionskonzepten Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP liegen die Emissionsfaktoren der RSD-Messung teilweise unter denen der PHEM-Kennfelder bzw. in derselben Größenordnung. Unter Berücksichtigung der erfassten PKW-Flottenzusammensetzung liegen die mittleren NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren der RSD-Messung ca. 22 % über denen der PHEM-Kennfelder.



**Abb. 3-25: Mittelwerte NO<sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) mit RSD-Messung**

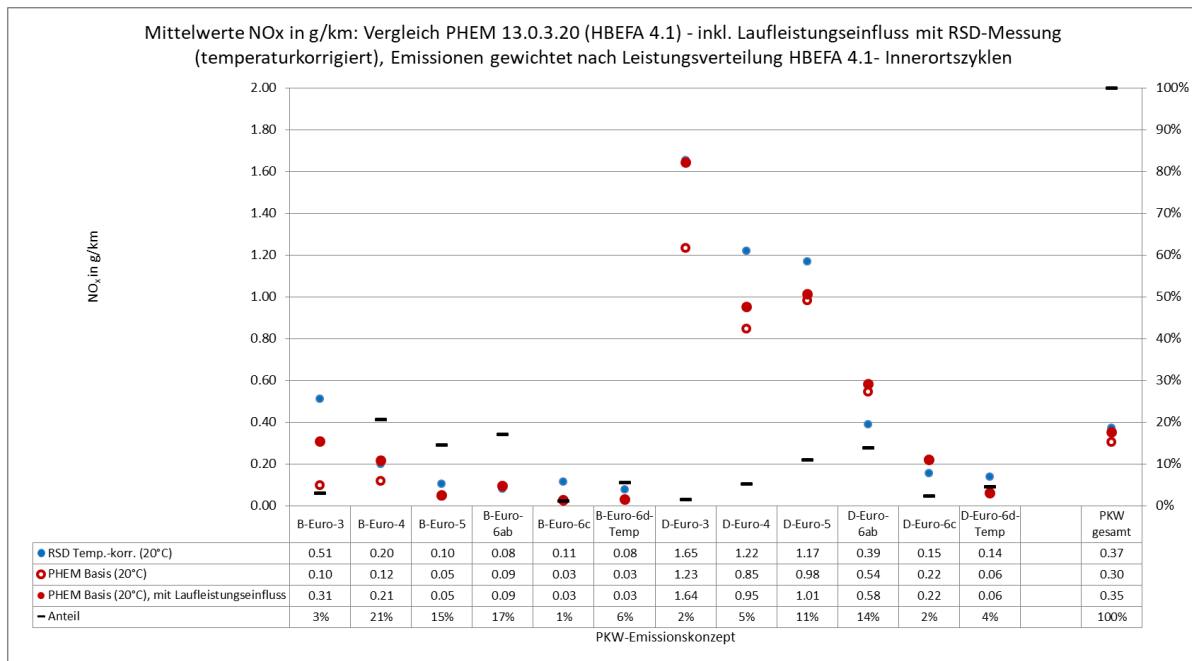
Neben der Temperaturkorrektur wird in HBEFA 4.1 bei der Höhe der NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren ein Laufleistungseinfluss angenommen, der berücksichtigt, dass sich der Wirkungsgrad der Abgasnachbehandlung mit zunehmendem Fahrzeugalter bzw. mit zunehmender Fahrleistung verschlechtert (siehe **Abb. 3-26**).

Für den Vergleich der RSD-Messung mit den Emissionsfaktoren aus HBEFA 4.1 wurde deshalb bei der Berechnung der NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren aus PHEM der in HBEFA angenommene Laufleistungseinfluss berücksichtigt. Wie in **Abb. 3-27** dargestellt, liegt demnach der PKW-NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktor der RSD-Messung ca. 5 % über den HBEFA-Emissionsfaktoren. In Anbetracht der RSD-NO<sub>x</sub>-Messtoleranz von ca. 15 % kann somit für die mittlere PKW-Emission eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den PKW-NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren der RSD-Messung und denen aus PHEM bzw. HBEFA festgestellt werden.



**Abb. 3-26: Emissionsseitige Berücksichtigung des Laufleistungseinflusses in HBEFA 4.1**





**Abb. 3-27: Mittelwerte NO<sub>x</sub> in g/km: Vergleich PHEM 13.0.3.20 (HBEFA 4.1) - inkl. Laufleistungseinfluss - mit RSD-Messung (temperaturkorrigiert), Emissionen gewichtet nach Leistungsverteilung HBEFA 4.1- Innerortszyklen**

### 3.4 NO<sub>2</sub> / NO<sub>x</sub> – Verhältnis

Viele deutsche und europäische Messstellen in Straßenschluchten zeigen Überschreitungen der Grenzwerte der 39. BImSchV beziehungsweise der europäischen Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG bei NO<sub>2</sub>, vor allem für den Jahresmittelwert. Dies führt zur Aufstellung von Luftreinhalteplänen. Teil der Luftreinhaltepläne sind Immissionsprognosen zur Beurteilung von möglichen Maßnahmen auf die NO<sub>2</sub>-Belastung. Diese setzt sich zusammen aus direkt emittiertem NO<sub>2</sub> und einem größeren photochemisch gebildeten Beitrag. Bei der photochemischen Bildung von NO<sub>2</sub> (im Folgenden NO-NO<sub>2</sub>-Konversion genannt) spielen entsprechende Vorläufersubstanzen, Sonnenstrahlung und direkte NO<sub>2</sub>-Emissionen eine Rolle.

Für Immissionsprognosen existieren verschiedene NO-NO<sub>2</sub>-Konversionsmodelle (siehe z.B. UBA, 2011). Derzeit wird i.A. das Modell entsprechend Düring et al. (2011) eingesetzt. Dieses Modell beruht auf dem Ansatz nach Hertel und Berkowitz (1989) für die Berechnung von Stundenmittelwerten, arbeitet aber mit Jahresmittelwerten. Als Ergebnis werden Jahresmittelwerte der NO<sub>2</sub>-Gesamtbelastung berechnet. In UBA (2011) wird die Anwendung des Ansatzes nach Hertel und Berkowitz (1989) bei Zeitreihenrechnungen bzw. des Ansatzes nach Düring et al. (2011) bei Berechnungen auf Basis von Jahresmittelwerten empfohlen. Beide Verfahren berücksichtigen die o.g. NO-NO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub>-Chemie (vereinfachter Umwandlungsmechanismus M1). Eine wichtige Größe in diesem vereinfachten Chemiemodell ist die genaue Kenntnis des direkten NO<sub>2</sub>-Anteils an der NO<sub>x</sub>-Abgasemission. Vergleiche von Modellierungen und Messungen der letzten Jahre lassen vermuten, dass die im HBEFA3.3/4.1 angegebenen NO<sub>2</sub>-Direktanteile höher sind als im Realverkehr.

Aus diesem Grunde wurde eine Analyse der RSD-Daten bzgl. der NO<sub>2</sub>-Direktanteile durchgeführt. Die Auswertungen bezogen sich dabei zunächst auf die PKW.

In die Auswertung wurden dabei alle validen Messwerte bzgl. Kinematik und NO-, NO<sub>2</sub>-Messung einbezogen. Das Verhältnis NO<sub>2</sub> / NO<sub>x</sub> wurde aus den Messgrößen g/kg berechnet. Extremwerte (< 5 % - Perzentil, > 95 % - Perzentil) wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

**Abb. 3-36** zeigt einen ersten Vergleich der NO<sub>2</sub>-Anteile der PKW aus RSD-Messung vs. HBEFA 4.1, differenziert nach Emissionskonzept. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf dem primär vorliegenden Messdatensatz. Die Anteile sind bei den Diesel-PKW der Abgasnorm Euro 5 und älter nur ca. halb so hoch wie in HBEFA angenommen. Bei der Abgasnorm Euro 6ab stimmen die Verhältnisse aus Messung und HBEFA-Annahmen relativ gut überein, bei Euro 6c und 6d sind die Anteile z.T. doppelt so hoch wie in HBEFA. Darüber hinaus ist bei

allen Emissionskonzepten eine starke Streuung der gemessenen  $\text{NO}_2$ -Verhältnisse zu beobachten.

Bei Benzin-PKW wird in HBEFA unabhängig vom Emissionskonzept ein  $\text{NO}_2$ -Anteil von 5 % angenommen. Die gemessenen Werte liegen jedoch mit 35 % (Euro 3) bis 68 % (Euro 6d) deutlich darüber.

Diese  $\text{NO}_2$ -Anteile erscheinen unplausibel und wurden daher einer weiteren Prüfung unterzogen. Zwei wichtige Gründe führen zu einer größeren Unsicherheit bei der Bestimmung des  $\text{NO}$  bzw.  $\text{NO}_2$ -Anteils: Zum ersten überlappen die Absorptionsspektren von  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$  im gemessenen Wellenlängenbereich; damit ist die Zuordnung zum einen oder anderen Molekül eher unsicher. Zum zweiten führt auch hier wieder die Differenzbildung zur Hintergrundkonzentration zu negativen Werten. Die negativen Werte kommen umso häufiger vor, je kleiner die absoluten Messwerte sind, also z.B. bei den Benzin-Pkw und den Diesel-Pkw der neuesten Generation. Beide Effekte können zu einer weiten Streuung von negativen bis Werten größer 100 % führen.

Vom Gerätehersteller OPUS wurde daher das folgende Vorgehen entwickelt, um die unphysikalischen bzw. unplausiblen Anteile herauszufiltern:

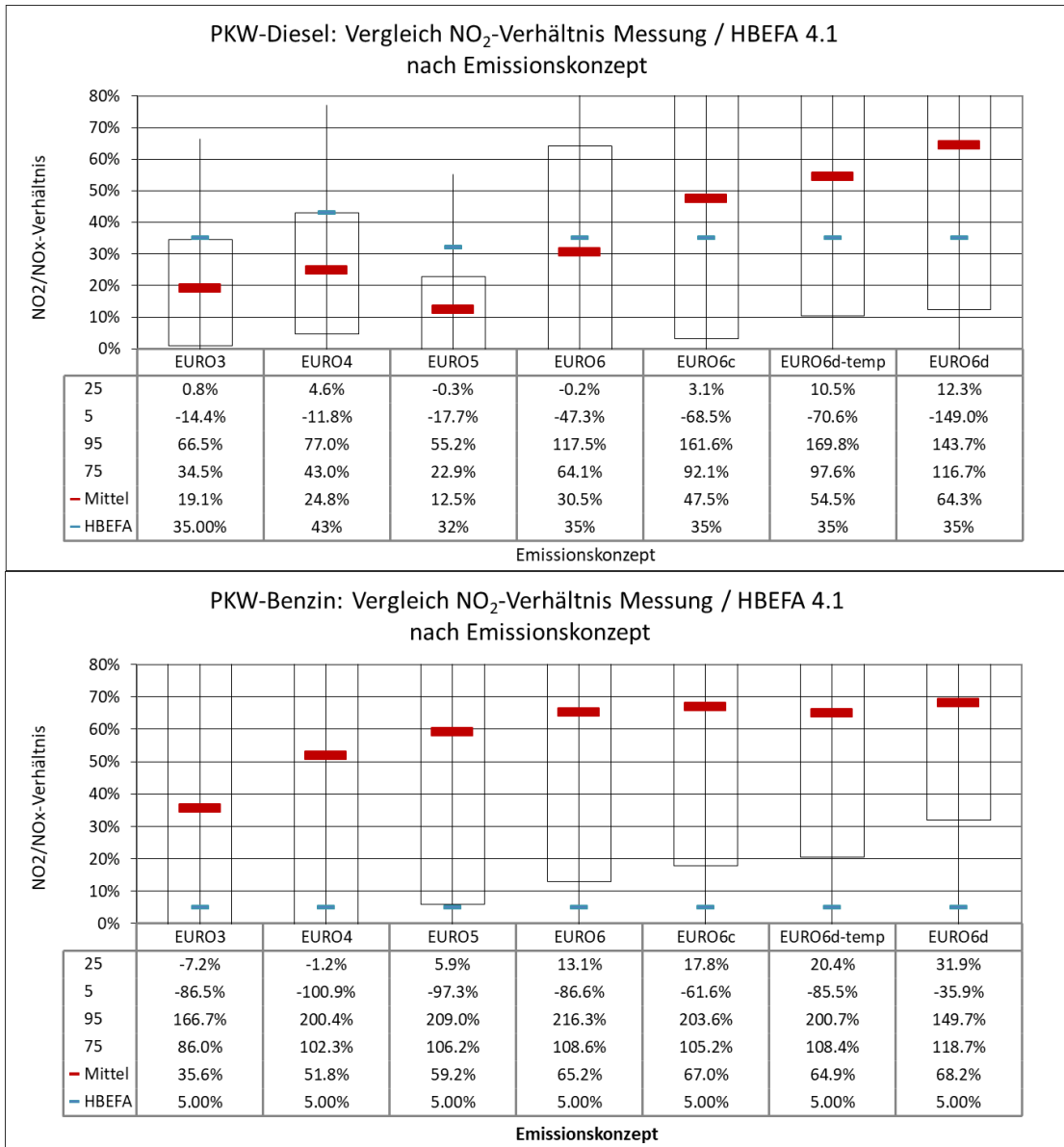
- $\text{NO}_2$ -Anteile grösser 100% werden verworfen. Solche Werte können vorkommen, wenn Konzentrationen in der Nähe des Detektionslimits liegen.
- Zusätzlicher Filter bei Diesel-Pkw: negative  $\text{NO}_2$ -Anteile werden verworfen
- Zusätzlicher Filter bei Benzin-Pkw: Wenn der bestimmte Anteil  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  größer 50 % ist, wird das als Ausreißer betrachtet und verworfen.

Diese Filterkriterien werden dem Hersteller zufolge nur für die Bestimmung des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Anteils angewendet. Sie verhindern, dass unphysikalische und z.T. sehr hohe Werte berücksichtigt werden. Für die Bestimmung der  $\text{NO}_x$ -Emissionsrate sollen sie nicht verwendet werden; hier werden nur die Ausreißer herausgenommen (die höchsten bzw. niedrigsten 5 % der Werte); negative Werte werden allerdings weiter berücksichtigt, ansonsten hätte der Mittelwert einen positiven Bias. Mit diesem Verfahren bleiben die hier bestimmten  $\text{NO}_x$ -Emissionsraten auch vergleichbar mit den Ergebnissen früherer Messkampagnen, insbesondere solche in der CONOX Datenbank.

Diese Nachjustierungen haben keine Auswirkungen auf die Höhe der  $\text{NO}_x$ -Emission, sodass die in Abschnitt 3.2 und 3.3 vorgenommenen Auswertungen davon unbeeinflusst bleiben. In

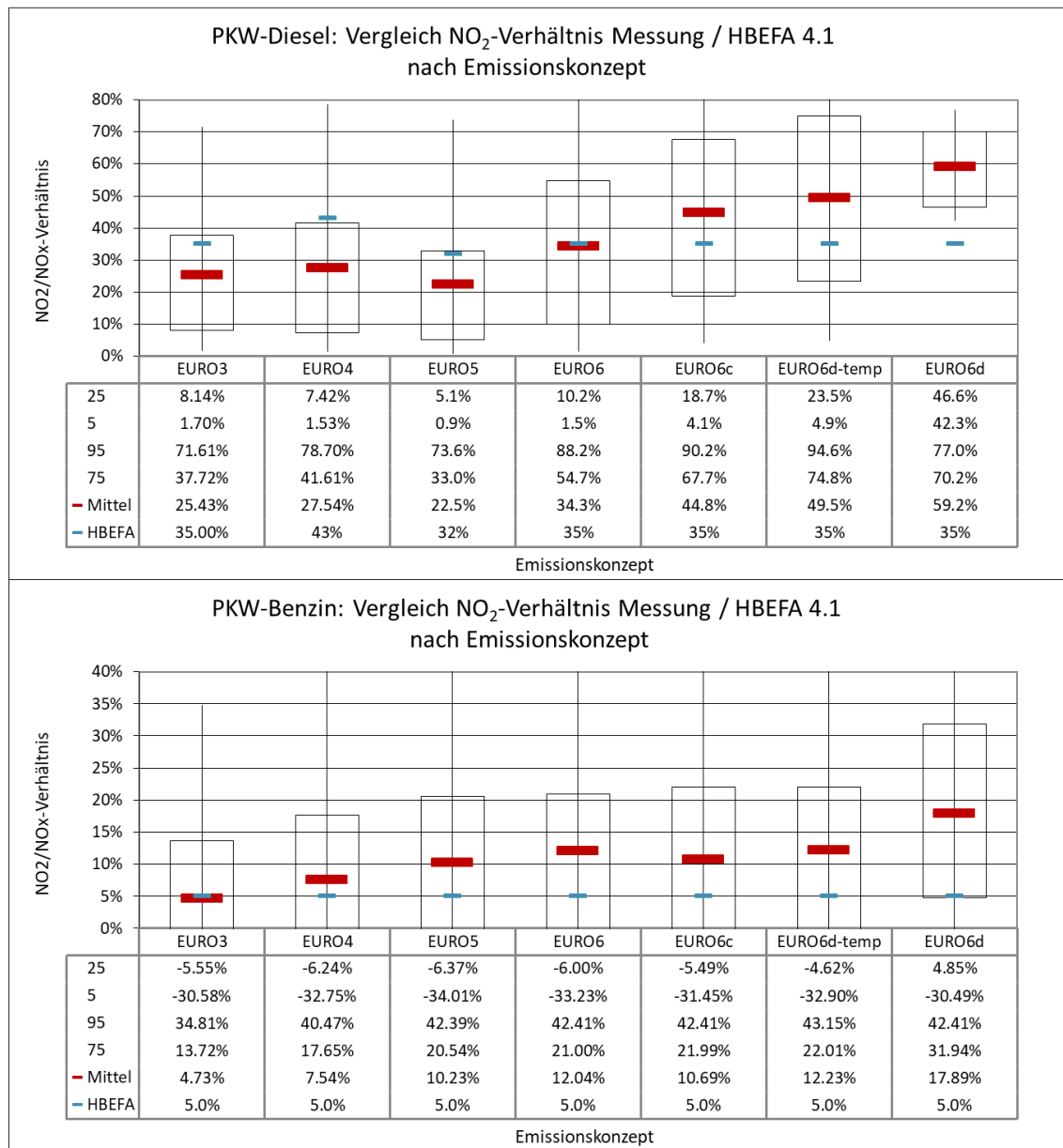
**Abb. 3-37** sind die Ergebnisse der Auswertung nach erfolgter Nachjustierung und unter Verwendung anderer Datenfilter dargestellt. Der Vergleich Primärdatensatz / nachjustierter Primärdatensatz zeigt, dass die  $\text{NO}_2$ -Anteile nach erfolgter Nachjustierung besser mit den in HBEFA angenommen Werten übereinstimmen. Für eine verlässliche Bestimmung im realen

Straßenbetrieb und in der Flotte ist allerdings ein verlässlicheres Messkonzept z.B. mit unterschiedlichen Wellenlängen oder schärferen Absorptionsspektren nötig<sup>66</sup>.

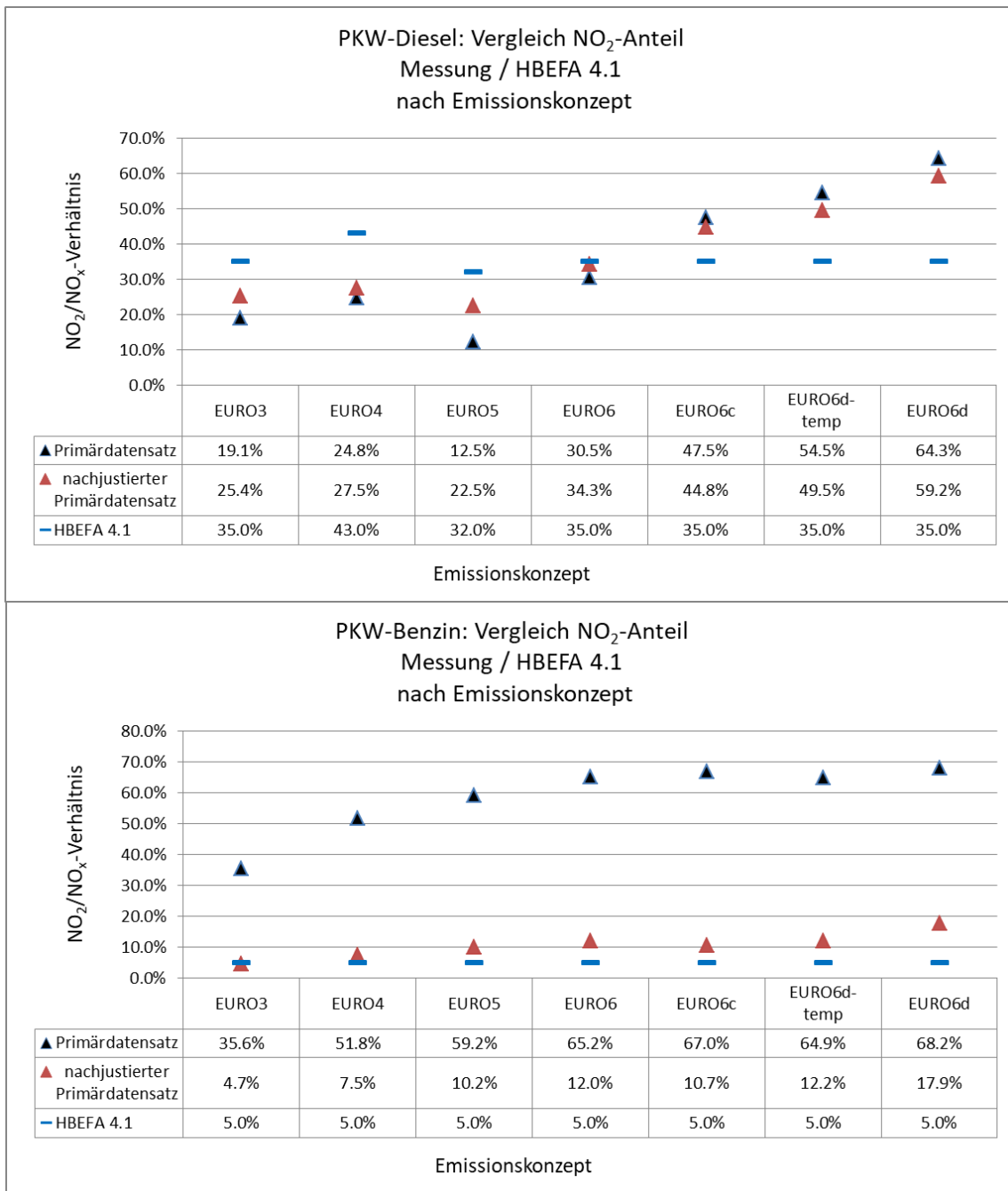


**Abb. 3-28: Vergleich der NO<sub>2</sub>-Anteile RSD-Messung (Primärdatensatz) / HBEFA 4.1**

<sup>66</sup> Das Forschungsinstrument FEAT der Universität Denver verfügt über einen zweiten Laser speziell für die Messung von NO<sub>2</sub>. Das RSD-Messgerät EDAR von HEAT Inc. misst in anderen und sehr schmalen Wellenlängen und erreicht daher eine sehr genaue Auflösung von NO und NO<sub>2</sub>.



**Abb. 3-29: Vergleich der NO<sub>2</sub>-Anteile RSD-Messung (nachjustierter Primärdatensatz) / HBEFA 4.1**



**Abb. 3-30: Vergleich NO<sub>2</sub>-Verhältnis Messung / HBEFA 4.1 nach Emissionskonzept**

### 3.5 Identifizierung von Fahrzeugen mit möglicherweise defizitärer Abgasreinigung („High Emitter“)

Fahrzeuge mit defizitärer Abgasreinigung haben erhöhte Schadstoffemissionen im Betrieb. Diese werden üblicherweise unter kontrollierten Testbedingungen relativ zu einem Bezugswert festgestellt (in-service conformity). Mit RSD werden allerdings nur instantane Emissionsraten erfasst, die auch bei gut geregelter Abgasreinigung hoch sein können. Daher ist die bloße Überschreitung eines wie auch immer gesetzten Schwellenwertes zunächst kein Beweis für das Vorliegen eines Defektes. Die Arbeitshypothese ist, dass je häufiger Emissionsspitzen auftreten, desto grösser die Wahrscheinlichkeit für ein Problem mit der Abgasreinigung ist. Allerdings steht bisher eine fundierte, allgemein anerkannte Korrelation aus. Daher werden im Folgenden verschiedene auffällige Emissionsspitzen diskutiert. Der Fokus liegt auf den Pkw mit (ausschließlichem) Benzin- oder Diesel-Antrieb, weil nur dort der nötige Stichprobenumfang gegeben ist. Ausgewertet werden nur vollständig gültige Datensätze, also bei denen Geschwindigkeit und Beschleunigung korrekt gemessen sind, die Emissionsmessung für den jeweiligen Schadstoff gültig ist, und die technischen Daten zumindest Fahrzeugklasse, Kraftstoffart, Euro-Stufe und Fahrzeugmasse umfassen. Damit umfasst die Grundgesamtheit fast 21 000 Benzin- und 16 000 Diesel-Pkw der Euro-Stufen 3 bis 6d-TEMP (vgl. **Tab. 3-9**).

Für schwere Nutzfahrzeuge und Busse sind die Stichproben valider Messwerte deutlich geringer, sodass eine statistische Auswertung bzgl. „High-Emitter“-Anteil nicht sinnvoll ist. Um dennoch ein Bild von der Datenlage zu geben, wurden die validen Messwerte der Busse und der Nutzfahrzeuge der Größenklasse N3 (SNF > 12 t zul. Gesamtgewicht) ausgewertet.

**Tab. 3-8: Charakteristik der untersuchten Stichprobe: Anzahl der individuellen Pkw je Schicht, durchschnittliche Motorlast und Emissionsrate.**

Antriebsart	Euro Stufe	Anzahl individuelle Fahrzeuge	Durchschnittliche Motorlast in kW	NO <sub>x</sub> in g/km	HC in g/km	CO in g/km	Smoke in g/km
Benzin	Euro 3	1061	13.2	0.811	0.507	5.001	0.008
Benzin	Euro 4	6976	14.1	0.390	0.202	3.537	0.004
Benzin	Euro 5	4801	15.0	0.190	0.067	1.933	0.004
Benzin	Euro 6b	5705	15.4	0.158	0.054	1.563	0.003
Benzin	Euro 6c	418	13.0	0.178	0.005	1.208	0.001
Benzin	Euro6d-TEMP	1923	15.0	0.125	0.047	1.388	0.002
Diesel	Euro 3	689	20.0	2.991	0.239	2.638	0.069
Diesel	Euro 4	2253	20.7	2.560	0.114	2.705	0.022
Diesel	Euro 5	4465	20.1	2.329	0.045	2.301	0.006
Diesel	Euro 6b	5882	19.4	1.002	0.005	2.038	0.001
Diesel	Euro 6c	995	21.7	0.425	0.013	2.123	0.002
Diesel	Euro6d-TEMP	1923	18.9	0.331	0.017	1.723	0.002

Von diesen individuellen Fahrzeugen haben immerhin 138 baugleiche Benzin- und bzw. 185 Diesel-Pkw sieben oder mehr gültige NO<sub>x</sub> Messwerte, aber nur 21 bzw. 54 Benzin- oder Diesel-Pkw wurden mindestens zehnmal vermessen. D.h. die Stichprobe von häufig gültig vermessenen Pkw ist recht begrenzt. Die mindestens siebenmal gemessenen Fahrzeuge werden im Folgenden dahingehend untersucht, ob sie auffällig hohe Emissionsraten relativ zum Typprüfwert bzw. zum Schichtmittel aufweisen.

### 3.5.1 Benzin-Pkw

Aus Prüfstandsmessungen und RSD-Messungen ist bekannt, dass die Benzin-Pkw im Realbetrieb die Emissionsgrenzwerte für NO<sub>x</sub>, CO und HC im Wesentlichen einhalten. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass Fahrzeuge mit Emissionsraten, die deutlich über dem Grenzwert (bzw. dem Schichtmittel) liegen, als auffällig gelten müssen. In der Auswertung wurden NO<sub>x</sub> und CO als Leitsubstanzen verwendet.

Als Schwellwert wird eine Überschreitung (größer sieben) von mindestens 600 %, 400 % bzw. 200 % für Euro 3, 4 oder 5 und höher angesetzt. Mit diesen Werten findet man wenige Dutzend auffällige Fahrzeuge (**Tab. 3-10**). Ein möglicher Einfluss von Kaltstarts kann nicht



ausgeschlossen werden; da aber die überwiegende Anzahl der Messwerte vom Standort „Am Seegraben“ stammt, ist das nicht wahrscheinlich. Daher sollten bei einer Inspektion diese wenigen Fahrzeuge vordringlich auf mögliche Mängel bei der Abgasreinigung geprüft werden.

**Tab. 3-9: Charakteristik der auffälligen Benzin-Pkw, die mindestens siebenmal vermessen wurden: Anzahl der individuellen Pkw je Schicht, durchschnittliche Motorlast und Emissionsrate.**

Euro Stufe	Überschreitung Grenzwert	Anzahl individuelle Fahrzeuge NO <sub>x</sub>	Anzahl individuelle Fahrzeuge CO	Durchschnittliche Motorlast in kW	NO <sub>x</sub> in g/km	CO in g/km
Euro 3	600%	2	1	12	1.74	17.19
Euro 4	400%	20	28	18	1.73	9.90
Euro 5	200%	19	27	15	0.46	5.33
Euro 6b	200%	9	16	17	0.34	5.21
Euro 6c	200%	0	0	na	na	na
Euro 6d-TEMP	200%	2	2	25	0.58	3.34

### 3.5.2 Diesel-Pkw

Bei Diesel-Pkw ist besonders relevant, ob der Partikelfilter wirkt. Dieser wurde mit Euro 5 relevant und sorgte für eine Minderung der partikelförmigen Emissionen um ca. 90 % (also eine Größenordnung). Mit der Absorptionsspektroskopie der RSD-Messgeräte werden allerdings keine Partikelmassen gemessen, sondern die Lichttrübung (Opazität). Nach Herstellerangabe ist das proportional zur Partikelmasse. Tatsächlich fällt der Mittelwert der Trübung von Euro 4 bis Euro 6 um mindestens eine Größenordnung ab. Wir nehmen daher hier an, dass Trübung und Massenkonzentration hinreichend korrelieren und dass hohe Trübungswerte auf einen hohen Partikelaustritt hinweisen. Wegen der Unsicherheiten wird eine Überschreitung des Schichtmittels um 500 % als Schwellwert angesetzt. Wenn die Korrelation gültig ist, dann finden sich in der Stichprobe ca. 20 Euro 6b, c und d-TEMP Pkw, deren Partikelfilter überprüft werden sollte.

**Tab. 3-10: Charakteristik der auffälligen Diesel-Pkw, die mindestens sieben Mal vermessen wurden: Anzahl der individuellen Pkw je Schicht, durchschnittliche Motorlast und Emissionsrate.**

Euro Stufe	Überschreitung Schichtmittel	Anzahl individuelle Fahrzeuge Opazität	Durchschnittliche Motorlast in kW	Opazität in g/km
Euro 3	>=500%	0	na	na
Euro 4	>=500%	4	38	0.36
Euro 5	>=500%	4	26	0.09
Euro 6b	>=500%	15	20	0.02
Euro 6c	>=500%	3	23	0.02
Euro 6d-TEMP	>=500%	1	11	0.03

### Finden sich besonders saubere Diesel-Pkw?

Diesel-Pkw bis Abgasstufe Euro 6d-TEMP hielten die Typpgrenzwerte für NO<sub>x</sub> im Realbetrieb quasi nie ein. Daher wird hier nicht nach Hochemittenten gesucht, sondern umgekehrt gefragt: Gibt es Fahrzeuge, die im Realbetrieb systematisch weniger NO<sub>x</sub> emittieren als der Grenzwert verlangt? Das Kriterium ist also, dass der Durchschnitt aus Sieben oder mehr RSD Messungen unter dem Grenzwert liegen soll: Für Euro 5, 6b, 6c und 6d-TEMP wird genau je 1 Fahrzeug identifiziert. Auch wenn die mittlere NO<sub>x</sub>-Emission der Euro 6d-TEMP Fahrzeuge gesunken ist, finden sich nur wenige Fahrzeuge mit besonders niedrigen Emissionen. Tatsächlich findet sich auch ein Euro 6d-TEMP Pkw mit durchschnittlich 1730 mg NO<sub>x</sub> /km, allerdings bei einer erhöhten Motorlast von durchschnittlich 38 kW. D.h. es kann ein Effekt des hohen Leistungsbedarfs sein, oder es kann darauf hindeuten, dass auch in dieser Fahrzeugschicht die Abgasreinigung nicht flächendeckend effizient funktioniert.

**Tab. 3-11: Charakteristik der Diesel-Pkw mit besonders niedrigen NO<sub>x</sub> Emissionen, die mindestens siebenmal vermessen wurden: Anzahl der individuellen Pkw je Schicht, durchschnittliche Motorlast und Emissionsrate.**

Euro Stufe	Unterschreitung Grenzwert	Anzahl individuelle Fahrzeuge NO <sub>x</sub>	Durchschnittliche Motorlast in kW	NO <sub>x</sub> in g/km
Euro 3	<=0%	0	na	Na
Euro 4	<=0%	0	na	na
Euro 5	<=0%	1	19	0.09
Euro 6b	<=0%	1	5	0.11
Euro 6c	<=0%	1	21	0.16
Euro 6d-TEMP	<=0%	1	16	0.09

Bei den Euro 5 Fahrzeugen ist interessant, ob sich ein Einfluss von einem Software oder Hardware Update auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen im Realbetrieb nachweisen lässt. Das Schichtmittel ist deutlich über dem Typprüfwert. Unter den 73 mindestens siebenmal erfassten Euro 5 Diesel-Pkw finden sich nur 4, deren Mittelwert mit ~350 mg/km um nicht mehr als 200 % über dem Grenzwert liegt. Alle anderen Fahrzeuge liegen (im beobachteten) Mittel höher. Das lässt vermuten, dass der Einfluss eines möglichen NO<sub>x</sub>-updates (oder Nachrüstung) sehr begrenzt ist.

### 3.5.3 Schwere Nutzfahrzeuge und Busse

#### 3.5.3.1 Schwere Nutzfahrzeuge

Für schwere Nutzfahrzeuge der Größenklasse N<sub>3</sub> (>12t) lagen 1193 Messwerte vor, wovon jedoch nur ca. die Hälfte valide Werte bzgl. Fahrdynamik (v\*a) und NO- und NO<sub>2</sub>-Messung aufweisen. Die meisten validen Messwerte liegen für Euro-VI<sup>7</sup>-Fahrzeuge vor (vgl. Übersicht in Abschnitt 3.1).

In **Tab. 3-13** ist eine Übersicht der RSD Messwerte für N<sub>3</sub>-Fahrzeuge bzgl. valider Messwerte bei VSP und Stickoxidemissionen dargestellt. Besonders deutlich ist dabei der starke Rückgang der NO<sub>x</sub>-Emissionsrate für die Euro-VI-Fahrzeuge zu beobachten, die um fast 90% unter dem Niveau der vorangegangenen Emissionsstufen liegt.

<sup>7</sup> Die Euro-Normen für schwere Nutzfahrzeuge und Busse werden mit römischen Zahlen nummeriert.

**Tab. 3-12: Übersicht der RSD Messwerte für N<sub>3</sub> Fahrzeuge (SNF): Zahl der Messwerte (brutto und vollgültig), VSP und NO<sub>x</sub> Werte**

Abgasnorm	Messwerte		VSP in kW/t	NO in g/kg	NO <sub>2</sub> in g/kg	NO <sub>x</sub> in g/kg
	gesamt	valide				
		1193				
Euro II	8	0	0.9	22.2	14.0	-
Euro III	43	13	4.4	21.1	3.2	35.9
Euro IV	56	28	6.3	21.5	1.5	34.3
Euro V	296	118	6.0	19.9	1.5	33.9
Euro VI	789	403	6.7	2.1	0.9	4.0

Unter den erfassten N<sub>3</sub>-Fahrzeugen befinden sich fünf Euro-VI-Fahrzeuge, für die mindestens fünf valide Messwerte vorliegen<sup>8</sup> (siehe **Tab. 3-14**). Darunter weist ein Fahrzeug (LKW Kipper, Daimler, zGg 18 t) mehr als dreimal höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen als der Rest der Euro-6-Fahrzeuge auf. Dies könnte ein Hinweis auf eine sub-optimale Abgasreinigung sein, eventuell in Zusammenhang mit einer unterdurchschnittlichen Leistungsanforderung.

**Tab. 3-13: Übersicht der RSD Messwerte für einzelne, mehrfach gültig vermessene N<sub>3</sub> Fahrzeuge (SNF): Zahl der Messwerte (brutto und vollgültig), VSP und NO<sub>x</sub> Werte.**

VehicleID	Abgasnorm	Messwerte		VSP in kW/t	NO in g/kg	NO <sub>2</sub> in g/kg	NO <sub>x</sub> in g/kg
		gesamt	valide				
850640	Euro IV	11	6	9.1	1.3	1.7	3.7
816244	Euro IV	13	5	4.5	7.9	2.3	14.6
830613	Euro IV	10	6	9.0	2.3	0.2	2.4
831153	Euro IV	9	5	8.4	1.3	1.1	2.3
852537	Euro IV	6	6	9.5	1.2	0.1	1.9

<sup>8</sup> Für ein Fahrzeug der Abgasnorm Euro-IV liegen 15 valide Messwerte vor. Da aber insgesamt nur 28 gültige Messwerte für Fahrzeuge dieses Emissionskonzeptes vorliegen, lassen sich diese Einzelmessungen nicht mit einem „Flottenmittel“ vergleichen.

### 3.5.3.2 Busse

Für Busse (M<sub>3</sub>) lagen 309 Messwerte vor, wovon jedoch nur 58 valide Werte bzgl. Fahrdynamik (v\*a) und NO- und NO<sub>2</sub>-Messung aufweisen. Die meisten validen Messwerte liegen für Euro-VI-Fahrzeuge vor.

In **Tab. 3-15** ist eine Übersicht der RSD Messwerte für Busse bzgl. valider Messwerte bei VSP und Stickoxidemissionen dargestellt.

**Tab. 3-14: Übersicht der RSD Messwerte für Busse (M<sub>3</sub>): Zahl der Messwerte (brutto und vollgültig), VSP und NO<sub>x</sub> Werte**

Abgasnorm	Messwerte		VSP in kW/t	NO in g/kg	NO <sub>2</sub> in g/kg	NO <sub>x</sub> in g/kg
	gesamt	valide				
	309	58	6.3	4.9	1.9	10.2
Euro III	14	5	2.7	2.9	0.5	5.3
Euro IV	0	0				
Euro V	102	19	10.7	6.4	2.8	14.7
Euro VI	193	34	4.3	4.4	1.4	8.4

Unter den erfassten Bussen befindet sich lediglich ein Bus, für den mindestens fünf valide Messwerte vorliegen (siehe **Tab. 3-16**). Die NO<sub>x</sub>-Werte dieses Fahrzeuges (Linienbus, EVOBUS CITARO, Euro-VI) weisen bei sehr niedriger Motorlast weit unterdurchschnittliche Emissionen auf. Für zwei weitere Euro-VI-Busse lagen jeweils drei valide Messwerte vor. Das Emissionsniveau dieser Busse liegt um den Faktor 2 bis 3 (beide Fahrzeuge Linienbus SCANIA) über dem der in **Tab. 3-15** dargestellten durchschnittlichen Euro-VI-Busse. Eine systematische Ursachenanalyse für die tendenziell höheren Emissionswerte ist jedoch auf Grund der geringen Stichprobe nicht möglich.

**Tab. 3-15: Übersicht der RSD Messwerte für einzelne, mehrfach gültig vermessene N<sub>3</sub> Fahrzeuge (SNF): Zahl der Messwerte (brutto und vollgültig), VSP und NO<sub>x</sub> Werte.**

VehicleID	Abgasnorm	Messwerte		VSP in kW/t	NO in g/kg	NO <sub>2</sub> in g/kg	NO <sub>x</sub> in g/kg
		gesamt	valide				
832360	Euro VI	9	5	1.6	0.6	0.0	0.1
830131	Euro VI	4	3	4.4	7.6	12.7	24.4
832333	Euro VI	9	3	4.5	8.9	2.9	17.6
832319	Euro V	5	3	20.7	0.4	0.0	0.6
832327	Euro V	10	3	7.8	3.8	1.3	7.6

### 3.5.4 Einordnung

Die Methode der Messung mit hintereinander geschalteten RSD-Geräten wurde hier erstmals angewendet und erfasst die Mehrzahl der Fahrzeuge erfolgreich. Aufgrund der relativ geringen Stichprobe an vollgültigen Mehrfach-Messwerten lassen sich allerdings keine Verallgemeinerungen über die Häufigkeit oder das durchschnittliche Emissionsniveau von High-Emittern treffen. Der Anteil „auffällige Fahrzeuge an gesamt“ weist je Fahrzeugschicht nur wenige Promille aus (mit einem Maximum von 1% bei den Euro 5 Benzin Pkw).

Für bessere Aussagen müsste die Zahl der Mehrfachmessungen höher sein, damit der Anteil der auffälligen Fahrzeuge innerhalb der Gruppe der mehrfach vermessenen Fahrzeuge bestimmt werden kann. Aller Erfahrung nach sinken dabei der Mittelwert und seine Streuung. Damit könnte die Trennschärfe verbessert werden, aber es ist nicht unbedingt zu erwarten, dass mehr Fahrzeuge gefunden würden. Für den Vollzug müssten allerdings zuerst Grundlagen geschaffen werden, um aufgrund von RSD-Messungen eine nähere Überprüfung und ggf. Korrektur der Emissionseigenschaften einzelner Fahrzeuge durchsetzen zu können.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

### Ziel

Mit dem Verfahren der „Remote Sensing Detection“ (RSD) wurden in Deutschland erstmals im öffentlichen Auftrag an einem Standort direkt die Abgasemissionen von vorbeifahrenden Fahrzeugen gemessen und PHEM modellierten Emissionsraten, mit den entsprechenden Werten aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) und aus der Typgenehmigung verglichen.

Außerdem wurde untersucht, ob mit RSD der Anteil von sogenannten „High-Emittern“ bestimmt werden kann, d.h. von Fahrzeugen, die aufgrund Alterung, technischer Defekte oder Abgas-Manipulationen stark erhöhte Realemissionen z.B. von Stickoxiden oder Partikeln aufweisen.

Das Projekt „Ermittlung der Emissionen von Kraftfahrzeugen im fließenden Verkehr mit Remote Sensing Detection (Emi-RSD)“ verfolgt damit folgende Ziele:

1. Bestimmung der Realemissionen von Kraftfahrzeugen im fließenden Verkehr
2. Bestimmung von Emissionsfaktoren und Vergleich mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA)
3. Vergleich von Realemissionen mit Emissionsgrenzwerten der Typgenehmigung
4. Identifizierung von „High-Emittern“ im Straßenverkehr

Das Vorhaben umfasst zwei Lose und dementsprechend zwei Arbeitspakete (AP):

Inhalt und Ziel des **AP1** ist die **Messung** der spezifischen Emissionen von Fahrzeugen im realen Straßenverkehr durch das Verfahren „Remote Sensing Detection“ und die Erfassung der Kennzeichen der zugehörigen Fahrzeuge. Als Ergebnis soll für jedes Fahrzeug die Emission der Luftschadstoffe NO, NO<sub>2</sub>, CO, Summe HC und optional von Partikeln in g/km für die Fahrsituation der Messung vorliegen.

Inhalt und Ziel des **AP2** ist die **Auswertung** der Kennzeichen sowie der RSD-Messdaten. Die Auswertung der RSD-Messdaten soll dabei vor allem einen Vergleich bzgl. der formalen Abgasstandards sowie der Emissionsfaktoren nach HBEFA umfassen.

## **Kennzeichenerfassung**

Die bei der Abgasmessung erfassten Kennzeichen wurden nach den Vorgaben der Zulassungsbehörde Berlin (Kennzeichen der in Berlin zugelassenen Fahrzeuge) und des Kraftfahrtbundesamtes (für nicht in Berlin zugelassene Fahrzeuge mit deutschen Kennzeichen) aufbereitet und den Behörden für einen Kennzeichenabgleich übergeben.

Von den Zulassungsbehörden wurden folgende Daten abgefragt:

- Jahr der Erstzulassung,
- Fahrzeughersteller und Modell,
- Fahrzeugklasse und Aufbauart,
- Kraftstoff/Antrieb,
- Emissionsklasse (Emissionsschlüsselnummer),
- Hubraum,
- Motorleistung in kW,
- Leergewicht,
- Gesamtgewicht, Fahrzeuglänge,
- Zahl der Achsen,
- Anzahl der Sitzplätze und der Stehplätze (Busse),
- CO<sub>2</sub>-Emissionswert für Pkw (soweit vorhanden) und
- soweit vorliegend: Ausrüstung mit Partikelfilter, SCR-Hardware-Nachrüstung und/oder Software-Update.

Im Rahmen der RSD-Messungen wurden insgesamt 60 564 unterschiedliche Kennzeichen erfasst, wovon 58 096 Kennzeichen Fahrzeugen zugeordnet werden konnten, die in Deutschland zugelassen sind. Die Datenabfrage dieser Kennzeichen beim KBA bzw. bei der Berliner Zulassungsbehörde bzgl. der entsprechenden Motordaten ergab einen Rücklauf von insgesamt 55 334 Kennzeichen.

## **Vergleich RSD-Messung / Grenzwert**

Die Mittelwerte der im Rahmen der RSD-Messungen erfassten NO<sub>x</sub>-Realemissionen bei den Pkw der Emissionsstufen Euro 3 bis Euro 6c liegen um den Faktor 2.5 bis 8 (Diesel) bzw. 2 bis 2.5 (Benzin) über den Grenzwerten der Typzulassung. Die Emissionen der PKW der Abgasmessung Euro 6d-TEMP bzw. Euro 6d liegen im Realbetrieb im Bereich des Grenzwertes bzw. ca. 60 % darunter (unter Berücksichtigung des entsprechenden Conformity/Konformitätsfaktors von 2.1 bei Euro 6d-TEMP bzw. 1.43 bei Euro 6d).



Der Vergleich der RSD-Messung mit den Typzulassungsgrenzwerten der übrigen Fahrzeugkategorien zeigt bei NO<sub>x</sub> eine ähnliche Tendenz. Bei der Schadstoffkomponente CO liegen die Realemissionen der älteren Emissionskonzepte tendenziell um den Faktor 2 bis 3 über den Grenzwerten für Neufahrzeuge, bei PM<sub>10</sub> liegen die Realemissionen aller Fahrzeugkategorien tendenziell im Bereich der Grenzwerte.

Unter Berücksichtigung des Laufleistungseinflusses ergibt sich für die Benzin-Pkw ein Bild, bei dem die Typprüfgrenzwerte für NO<sub>x</sub> Emissionen auch im Realbetrieb (innerorts) bei allen betrachteten Emissionskonzepten eingehalten werden. Umgekehrt bestätigen die RSD Messungen eindrucksvoll, dass bei mehr als 75% aller gemessenen Fahrbedingungen und Fahrzeugtypen der Diesel Pkw der Euro Stufen 3, 4 und 5 die NO<sub>x</sub>-Grenzwerte überschritten werden. Eine deutliche Minderung ist erst mit Euro 6 eingetreten.

#### **Vergleich RSD-Messung / PHEM bzw. HBEFA 4.1**

Ein weiteres Ziel des Projektes war der Vergleich der RSD-Emissionsraten mit den Emissionsfaktoren des HBEFA 4.1. Ein direkter Vergleich der instantanen Emissionsraten, die bei den RSD-Messungen für den momentanen Fahrzustand erfasst werden, mit den mittleren Zyklusemissionsfaktoren der HBEFA-Verkehrssituationen ist jedoch nicht sinnvoll. Deshalb erfolgte der Vergleich auf Basis der leistungsspezifischen Emissionsraten des dem HBEFA zu Grunde liegenden "Passenger car and heavy duty Emission Model" (PHEM). Der Vergleich bezog sich dabei auf die Stickoxidemissionsfaktoren der Benzin- und Diesel-PKW.

Die Mittelwerte der PKW-NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren in g/km aus PHEM wurden denen aus den RSD-Messungen (Realtemperatur sowie normiert auf 20°C) auf Basis der Leistungen vergleichend gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, dass die Emissionsfaktoren der RSD-Messungen bei allen Emissionskonzepten und Leistungsintervallen tendenziell über denen der PHEM-Emissionen liegen.

Für eine integrative Betrachtung der Emissionen über alle relevanten Leistungsintervalle erfolgte eine Wichtung der leistungsspezifischen Emissionen mit der mittleren PKW-Leistungsverteilung der HBEFA 4.1-Fahrzyklen.

Demnach liegen die temperaturkorrigierten PKW-NO<sub>x</sub>-Emissionen der Emissionskonzepte (Euro 3 bis Euro 5) sowohl bei den Benzin- als auch bei den Diesel-PKW in den RSD-Messungen tendenziell über denen der PHEM-Emissionskennfelder. Bei den

Emissionskonzepten Euro 6ab bis Euro 6d-TEMP liegen die Emissionsfaktoren der RSD-Messung teilweise unter denen der PHEM-Kennfelder bzw. in derselben Größenordnung. Unter Berücksichtigung der erfassten PKW-Flottenzusammensetzung liegen die mittleren NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren der RSD-Messung ca. 22 % über denen der PHEM-Kennfelder.

Neben der Temperaturkorrektur wird in HBEFA 4.1 bei der Höhe der NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren ein Laufleistungseinfluss angenommen, der berücksichtigt, dass sich der Wirkungsgrad der Abgasnachbehandlung mit zunehmendem Fahrzeugalter bzw. mit zunehmender Fahrleistung verschlechtert

Für den Vergleich der RSD-Messung mit den Emissionsfaktoren aus HBEFA 4.1 wurde deshalb bei der Berechnung der NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren aus PHEM der in HBEFA angenommene Laufleistungseinfluss berücksichtigt. Der PKW-NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktor der RSD-Messung liegt demnach ca. 5 % über den HBEFA-Emissionsfaktoren. In Anbetracht der RSD-NO<sub>x</sub>-Messtoleranz von ca. 15 % kann somit für die mittlere PKW-Emission eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den PKW-NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren der RSD-Messung und denen aus PHEM bzw. HBEFA festgestellt werden.

### **Ermittlung von „High-Emittern“**

Das Vorkommen von möglichen Hochemittenten wurde für Benzin- und Diesel-Pkw analysiert. In jeder Fahrzeugschicht scheinen wenige Fahrzeuge auffällig; in der vorliegenden Kampagne wurden bis zu 1% (hier: Benzin-Pkw Euro 5) als auffällig identifiziert. Genauere Aussagen wären nur bei einem größeren Stichprobenumfang möglich.

Bei den Diesel-Euro-5-PKW ist bei der vorliegenden Messung kein wesentlicher Einfluss eines möglichen Soft- oder Hardware Updates auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen nachweisbar.

## 5 LITERATUR

- Borken-Kleefeld, Jens, and Yuche Chen (2015): 'New Emission Deterioration Rates for Gasoline Cars – Results from Long-Term Measurements'. Atmospheric Environment 101 (January): 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.013>.
- Borken-Kleefeld, J., Hausberger, S. et al. (2018): "Comparing Emission Rates Derived from Remote Sensing with PEMS and Chassis Dynamometer Tests - CONOX Task 1 Report" (Gothenburg, Sweden: IVL Swedish Environmental Research Institute)
- Chen, Yuche, Yunteng Zhang, and Jens Borken-Kleefeld (2019): 'When Is Enough? Minimum Sample Sizes for On-Road Measurements of Car Emissions'. Environmental Science & Technology 53 (22): 13284–92. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04123>.
- Düring, I., Bächlin, W., Ketzler, M., Baum, A., Friedrich, U., Wurzler, S. (2011): A new simplified NO/NO<sub>2</sub> conversion model under consideration of direct NO<sub>2</sub>-emissions. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 20 067-073 (February 2011).
- Hausberger et.al (2009): Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3, funded by Umweltbundesamt GmbH Österreich, Lebensministerium Österreich, BMVIT Österreich and Joint Research Centre and ERMES members, Report Nr. I-20/2009 Haus-Em 33/08/67, Graz, 2009
- Hertel, O. Berkowitz. R. (1989): Modelling NO<sub>2</sub> concentrations in a street canyon. DMU Luft A-131. National Environmental Research Institute, Division of Emissions and Air Pollution, Denmark. 1989.
- Heusch/Boesefeldt (1993): Untersuchungen des repräsentativen Fahrverhaltens von PKW auf Stadt- und Landstraßen; Heusch/Boesefeldt Beratende Ingenieure für Verkehrstechnik und Datenverarbeitung GmbH, Aachen und TÜV Rheinland, Köln; im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, 1993
- Lohmeyer (2019): Kfz-Kennzeichenerfassung 2018 an 10 Standorten in Berlin. Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG unter Mitarbeit von SVU Dresden, Planungsbüro Dr. Hunger und CAT Traffic, Cichon Automatisierungstechnik GmbH, Radebeul. Projekt 71555-18-0, Mai 2019. Gutachten im Auftrag von: Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Berlin.
- UBA (2011): Stand der Modellierungstechnik zur Prognose der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Luftreinhalteplänen nach der 39. BImSchV von Lina Neunhäuserer, Volker Diegmann, Günter Gäßler, Florian Pfäfflin, IVU Umwelt GmbH, Freiburg Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Forschungskennzahl 363 01 333, UBA-FB 001547. Mai 2011 siehe <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4191.pdf>
- UBA (2019): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 4.1 / August 2019. Erarbeitet durch INFRAS AG Bern/Schweiz in Zusammenarbeit mit IFEU Heidelberg. Hrsg.: Umweltbundesamt Berlin. <http://www.hbefa.net/d/start.html>.

**A N H A N G A1:**  
**BESCHREIBUNG OPUS-MESSSYSTEM**

The main objective of this project is to deepen the understanding of RSD technology, to explore its requirements, possibilities and limitations in Germany, to understand how it can be implemented in the future and, during a measurement campaign, to analyze vehicle emissions.

To introduce all of the above, this chapter explains the RSD technology.

(Alle Bildrechte in diesem Anhang: © OPUS RSE)

## Description

**Opus AccuScan™ RSDs** remotely measure exhaust emissions from motor vehicles as they are driven past the remote sensing device on streets and highways. The emissions are measured spectroscopically by casting a narrow infrared (IR) and ultraviolet (UV) beam of light across the road and through the trailing exhaust of passing motor vehicles. A mirror then reflects the IR/UV light back to a series of detectors that measure the amount of transmitted light at characteristic wavelengths absorbed by the pollutants of interest.

By subtracting any pre-vehicle background absorption from the amount of IR/UV light absorbed by the various tailpipe pollutants, the system can determine the pollutant levels in the vehicle's exhaust. As the emissions are measured, the video camera captures a digital image of the license plate and the speed/acceleration sensors record the speed and acceleration of the vehicle. The emissions, weather conditions, slope, speed and acceleration data as well as the license plate image are merged within less than a second to complete a measurement record which is then stored in a computer database for future analysis and reporting.

The RSD can measure the emissions of vehicles circulating under real driving conditions. Since it takes only a second to capture a measurement, these devices can capture large quantities of vehicle emissions data in a short period of time. Also, since it is a non-intrusive technique, the RSD audits the circulating vehicles without interfering with the traffic flow, therefore it can audit an entire fleet in a short period and with no impact on daily operations.

AccuScan™ RSDs have measured **hundreds of millions of vehicles worldwide**, far more than any other technology.

## Components

RSDs are comprised of three main systems, all of which can be placed safely off the traveled roadway:

6. Emissions Analyzers.
7. License Plate Cameras.
8. Speed and Acceleration Measurement Systems.

Together the three gather the minimum required information to evaluate the emissions health of a vehicle.

A typical mobile installation of the various RSD components is shown below (Figure 8-1).

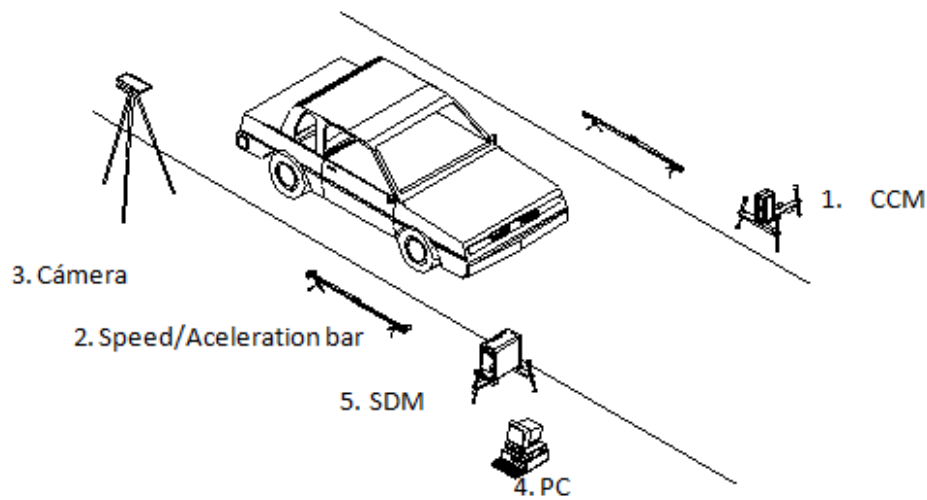


Figure 8-1 RSD components

The main components of an RSD5000 system are described below:

#### Gas Analyzer / Source Detector Module (SDM)

The RSD has an enclosed Source Detector Module. Using Sapphire windows, the SDM is sealed against the environment to better protect the optics and electronics inside. These windows are impervious to scratching and are easily cleaned. Along with an enclosed SDM, the RSD can have an automated gas calibration cell that eliminates the need for using gas calibration bottles and will calibrate during normal traffic movement (Figure 8-2).



Figure 8-2 Gas Analyzer / Source Detector Module

#### The Corner Cube Mirror (CCM)

The Corner Cube Mirror (CCM) is a simple reflector of the Source light beams. It returns the beams back to the Detector side of the SDM. The CCM consists of three stationary mirrors positioned at a 90° angle with respect to one another, like the corner of a room (Figure 8-3).



Figure 8-3 The Corner Cube Mirror

### Speed/Acceleration System (Detector/Emitter Bars)

This system provides valuable information to the operator about the driving conditions of the vehicles at the time of the measurement. Poor test sites can be immediately identified by test results showing too many cars undergoing hard accelerations or decelerations. The Emitter and Detector Bars of the S/A system along with other parts of the RSD work in tandem to help the operator determine if a test site is favorable to capturing accurate emission readings (Figure 8-4).



Figure 8-4 Speed/Acceleration System

### Video Camera for License Plate Capture

This high-speed video camera captures a digitized picture of the rear of the vehicle. It does this at the same instant the speed/acceleration values of a vehicle are calculated as the car passes through the exit beam of the S/A detector bar. Camera is software controlled from console. The software allows for control of pan, tilt and zoom, light control offset that automatically compensates for the lighting conditions throughout the day (Figure 8-5).



Figure 8-5 Video Camera for License Plate Capture

### System Control Unit

The System Control Unit (SCU) utilizes Windows based XP, an Intel P4-3.0GHz or greater processor, a built-in 802.11g WiFi communication to the remote GUI Laptop and a built-in GPS module. The SCU gathers and integrates the emission readings, speed and acceleration values and video picture of the license plate. It also archives all information including the digitized vehicle license plate picture for future reference. The SCU also mediates electronic connections between the computer, monitor, CPU and other modules. The SCU provides the connection for all the peripherals to the computer and serves as a central power supply for the system (Figure 8-6).



Figure 8-6 System Control Unit

### Weather Station

The Weather Station monitors external temperature and barometric pressure. The station includes an external temperature sensor. The console includes a power adapter with battery backup, backlit display for easy viewing, and a serial interface to a computer (Figure 8-7).



Figure 8-7 Weather Station

### On-road setup and operation

For convenience and fast semi-unattended deployment, OPUS has packaged all the components into two rapidly-deployed green boxes (see Figure 8-8) and one disguised orange traffic barrel:

Component	Length	Width	Height
SDM/CCM Green Box	0.92 meters	0.61 meters	0.46 meters
CCM Green Box	0.61 meters	0.31 meters	0.31 meters



Figure 8-8 Unattended Deployment

A typical on-road deployment is shown in Figure 8-9.



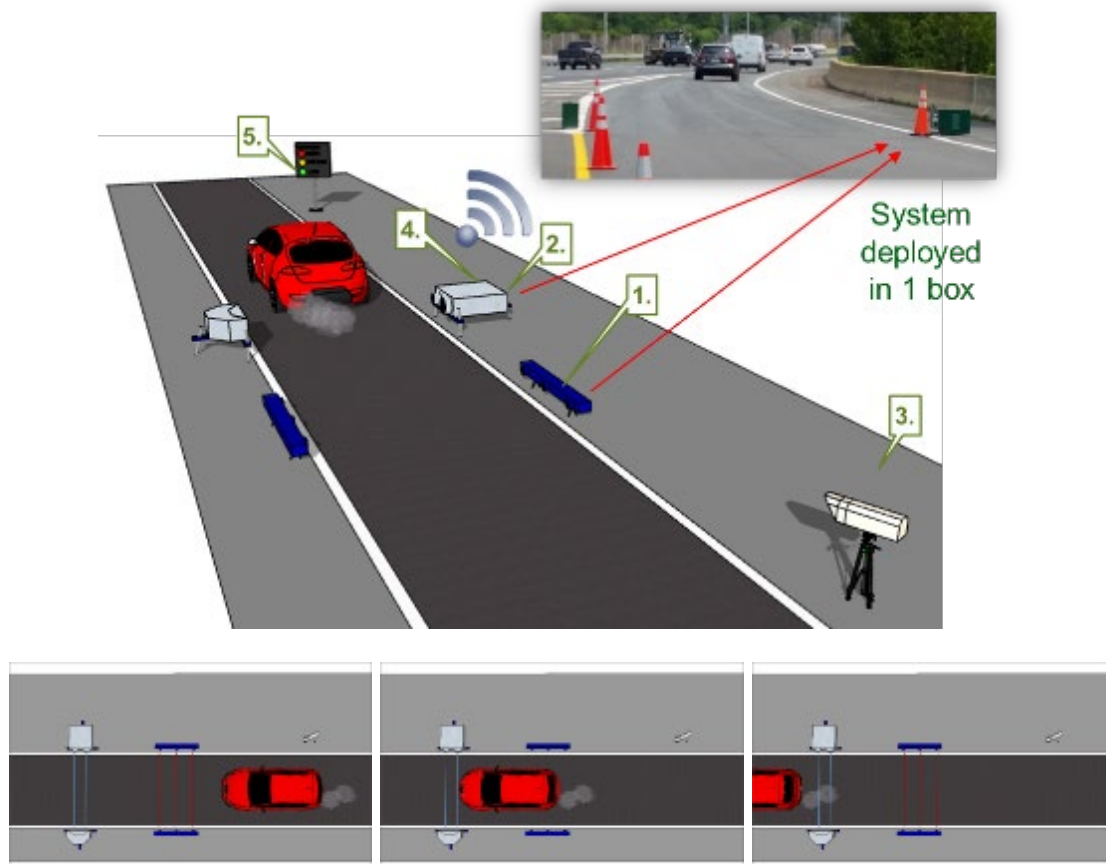


Figure 8-9 Scheme of Opus RSD

The overall process of a measurement, referred to the numbers of Figure 8-9 is shown below:

1. The Speed and Acceleration bar records the vehicle's speed and acceleration.
2. The SDM/CCM module measures all exhaust pollutants.
3. The digital camera takes a picture of the license plate.
4. Data are instantaneously sent to a processor unit. Emissions concentration values and other related data are stored in the computer and can also be monitored remotely by an operator stationed in a mobile unit parked safely along the roadside (see Figure 8-10).
5. It is also possible to set-up an informative LED panel to alert the driver about his/her emissions (Good, Poor, Bad).

After all that, the system is ready to analyze the next vehicle.

Overall process takes less than one second.

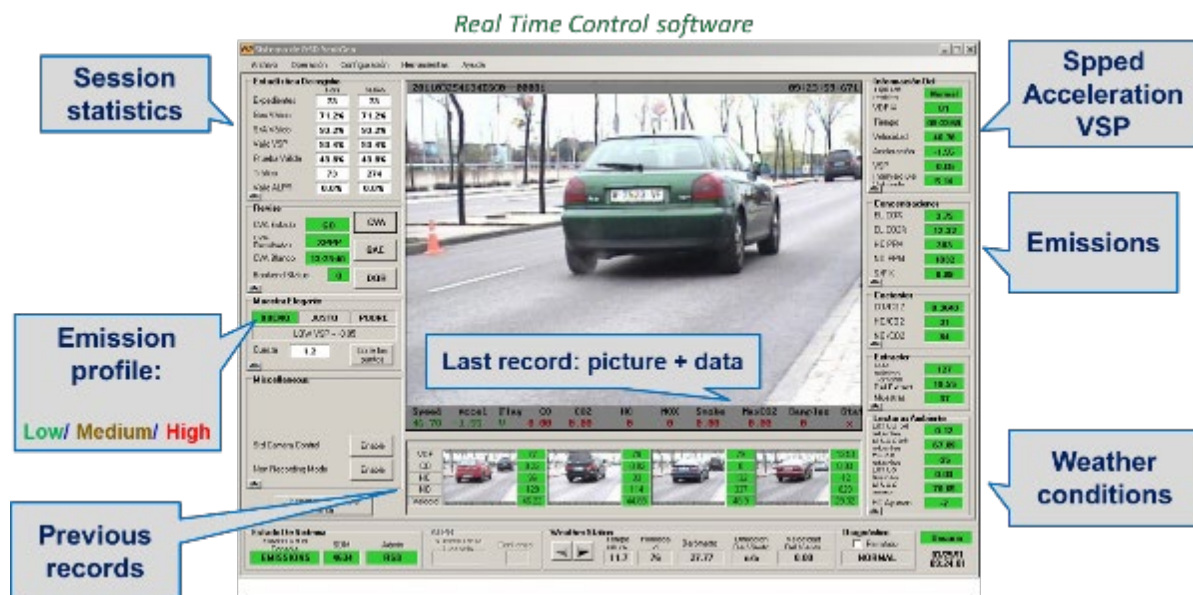


Figure 8-10 Sample of a vehicle measurement screen plot in Opus real-time monitoring software

## Functionality and performance

OPUS establishes the accuracy and precision of each AccuScan™ RSD unit deployed in its programs prior to its deployment. This is accomplished through a comprehensive set of pre-deployment, real-time, and post-data collection protocols which are briefly described below.

- **Factory Certification:** Each RSD unit is first factory certified for accuracy and precisions using several known dry-gas mixtures in accordance with the COVERS requirements.
- **Client Certification:** Some clients, such as the CDPHE, conduct their own acceptance test procedure (ATP) before units are deployed for use in programs.
- **Field Calibration and Audit:** Each unit is then calibrated, and the calibration verified prior to each data collection session.
- **Periodic Audits:** Each unit is then audited regularly during the course of each session to verify the system is performing within specifications and does not need re-alignment and/or re-calibration.
- **Real-time Measurement Validation:** As data is collected, sophisticated Accuscan™ exhaust plume validation software (developed and improved over two decades) reviews each measurement in real-time to ensure it is of adequate strength, that the exhaust plume decayed in a manner consistent with warm loaded-mode vehicle operations, and that the prevailing background levels are stable and can be accurately determined. Valid measurements that have passed the real-time filters are marked accordingly.

- Post-Collection Filters: Each session's dataset is reviewed post-collection to normalize calibration variances, eliminate cold starts, and apply VSP filters. These and other post-collection reviews have been developed over our decades of conducting studies, pilots and programs.

The Factory and Client Certifications focus on ensuring the unit is measuring within accuracy and precision tolerances. The Field Calibration and Audits focus on ensuring the unit is optimally calibrated and effectively subtracting background levels. The **Real-Time Validation software** filters out any measurements that cannot be used with a high degree of confidence in monitoring or screening applications. The Post-Collection Filters further remove those measurements that might have been captured during operating conditions when the vehicle (by design) is unable to effectively control its emissions. Following these sequential stages of quality assessment, review, and control only the most accurate and representative measurements of the vehicle's on-road emissions are used in analysis.

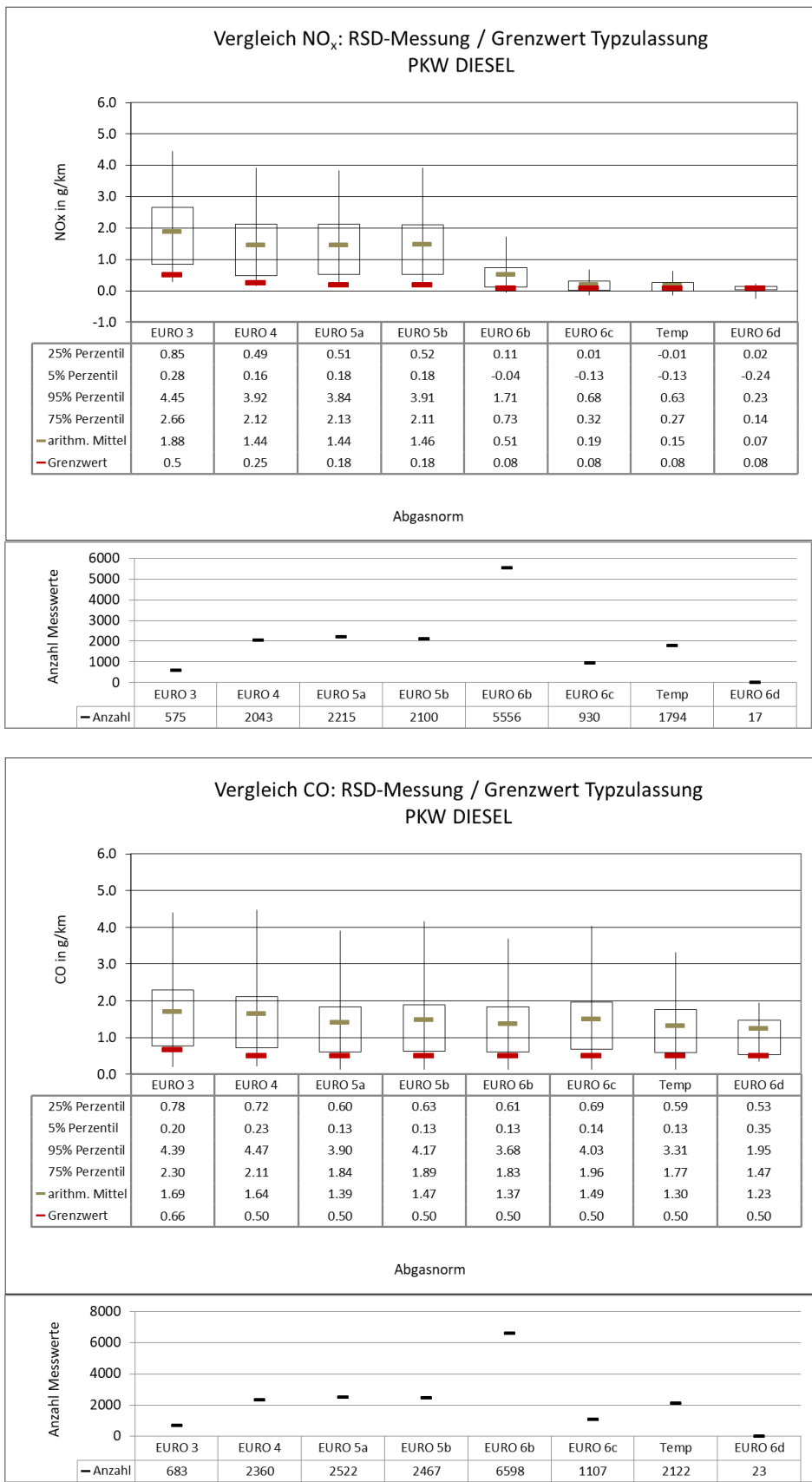
Moreover, Opus RSE is worldwide the only **ISO-17025 accredited laboratory** for the unobtrusive remote measurement of real traffic emissions. This certificate is audited annually and proves that our company fulfills the requirements for testing and calibration as a laboratory. Therefore, our Remote Sensing activities are within the standards of a portable laboratory, ensuring the quality and precision of our processes and results.

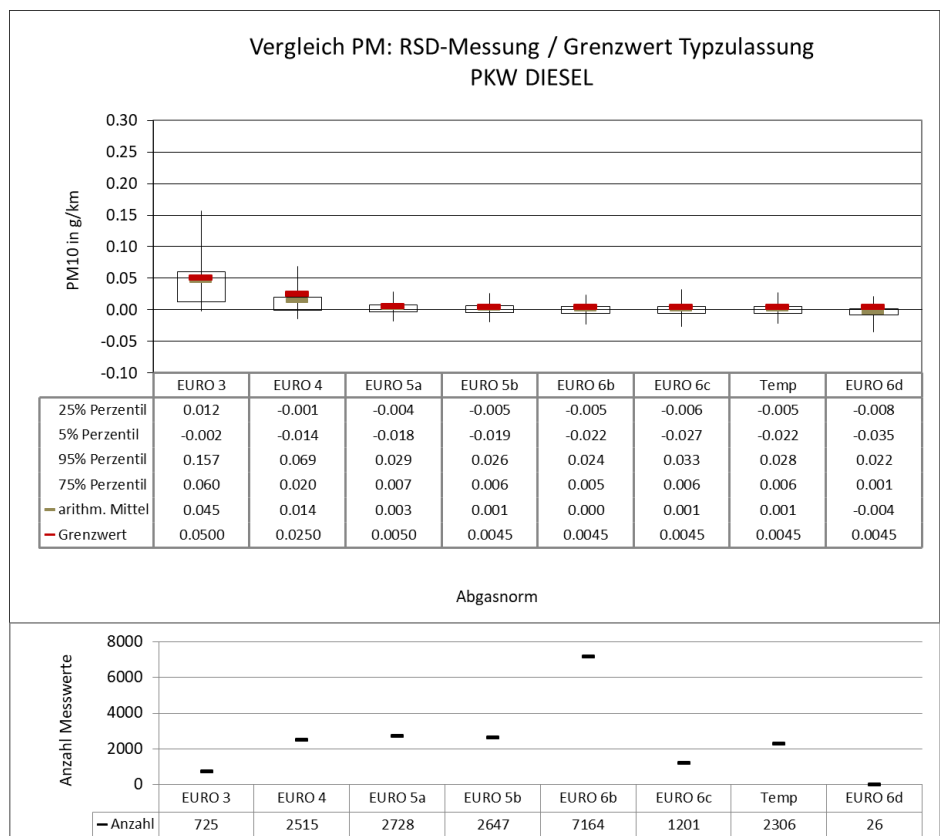
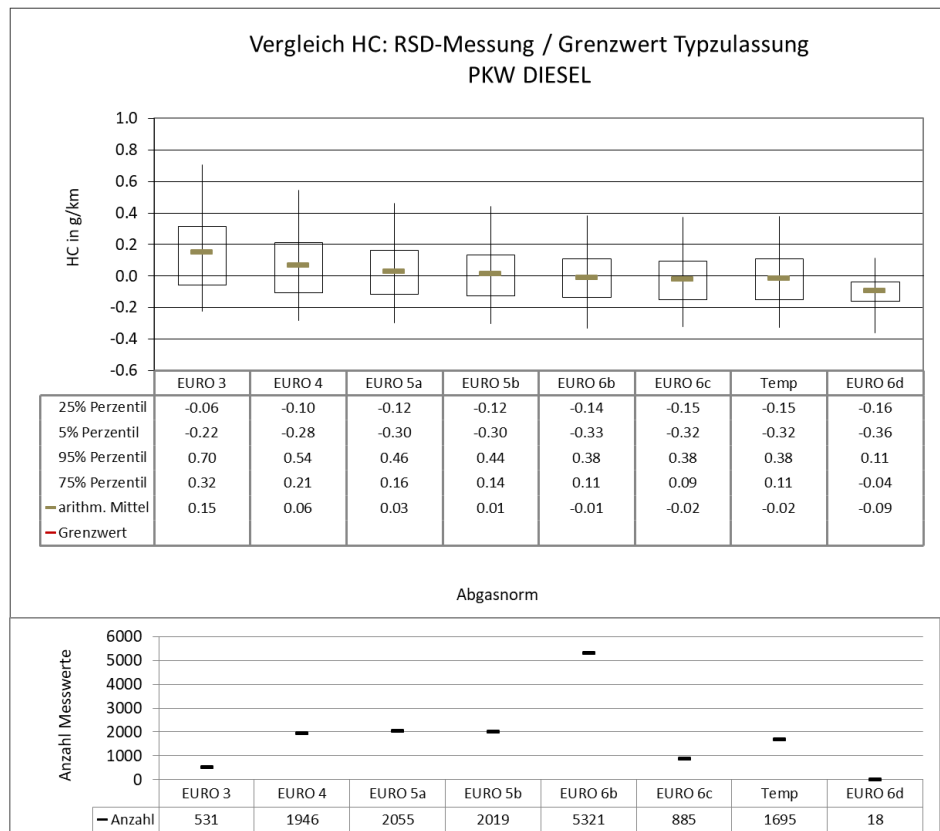
Accuracy and precision of RSDs have historically been assessed using dry mixtures of exhaust gas pollutants in a controlled setting (i.e. remote parking lot or untraveled section of roadway). These known mixtures of CO, Propane for HC, NO, and CO<sub>2</sub> in an N<sub>2</sub> balance) are released repeatedly behind an electric vehicle or introduced directly in the optical measurement path. AccuScan™ RSDs have been evaluated in this manner since the mid-1990s when first industry performance specifications were introduced.

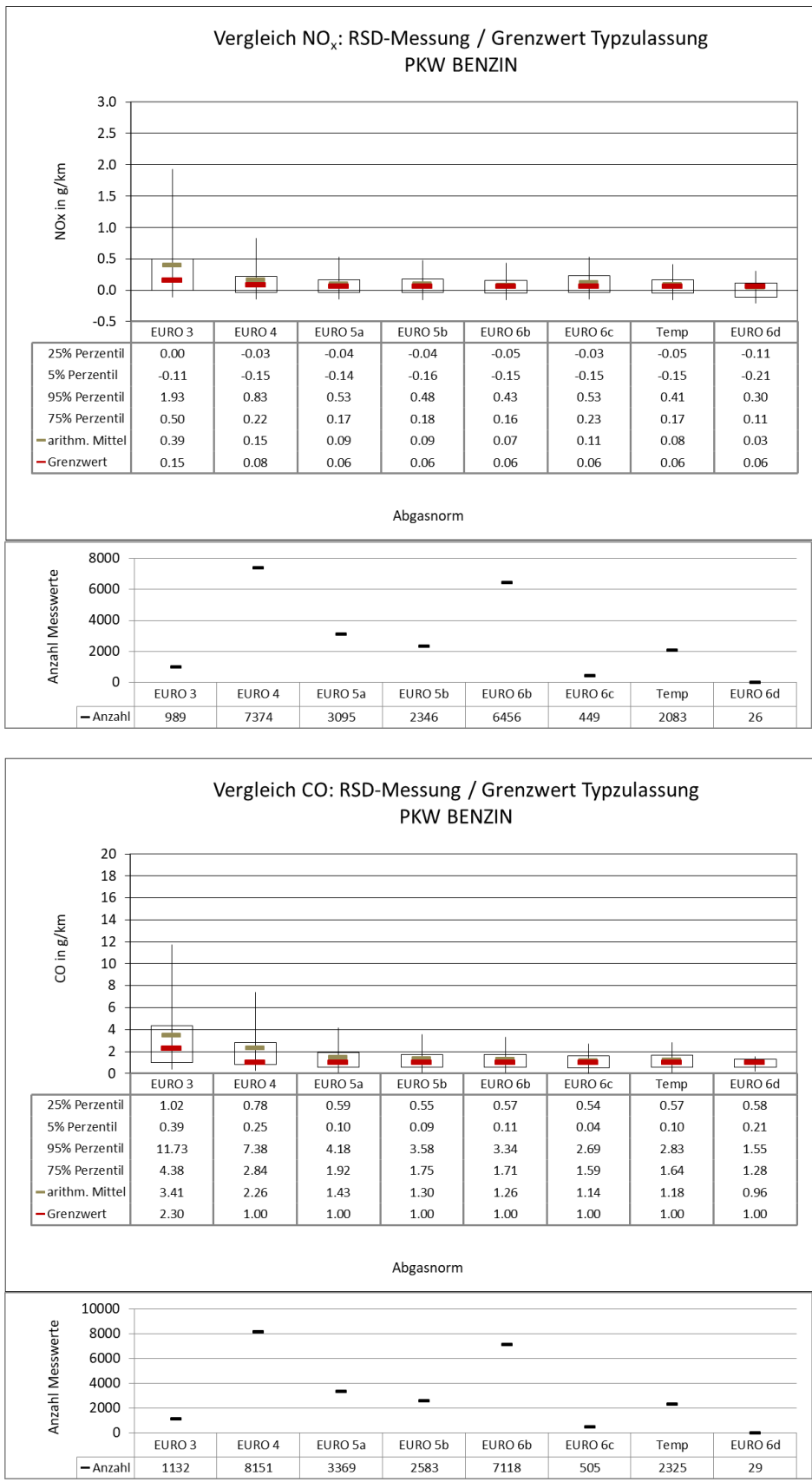
Apart from those certificates, our RSDs have also been audited by other entities:

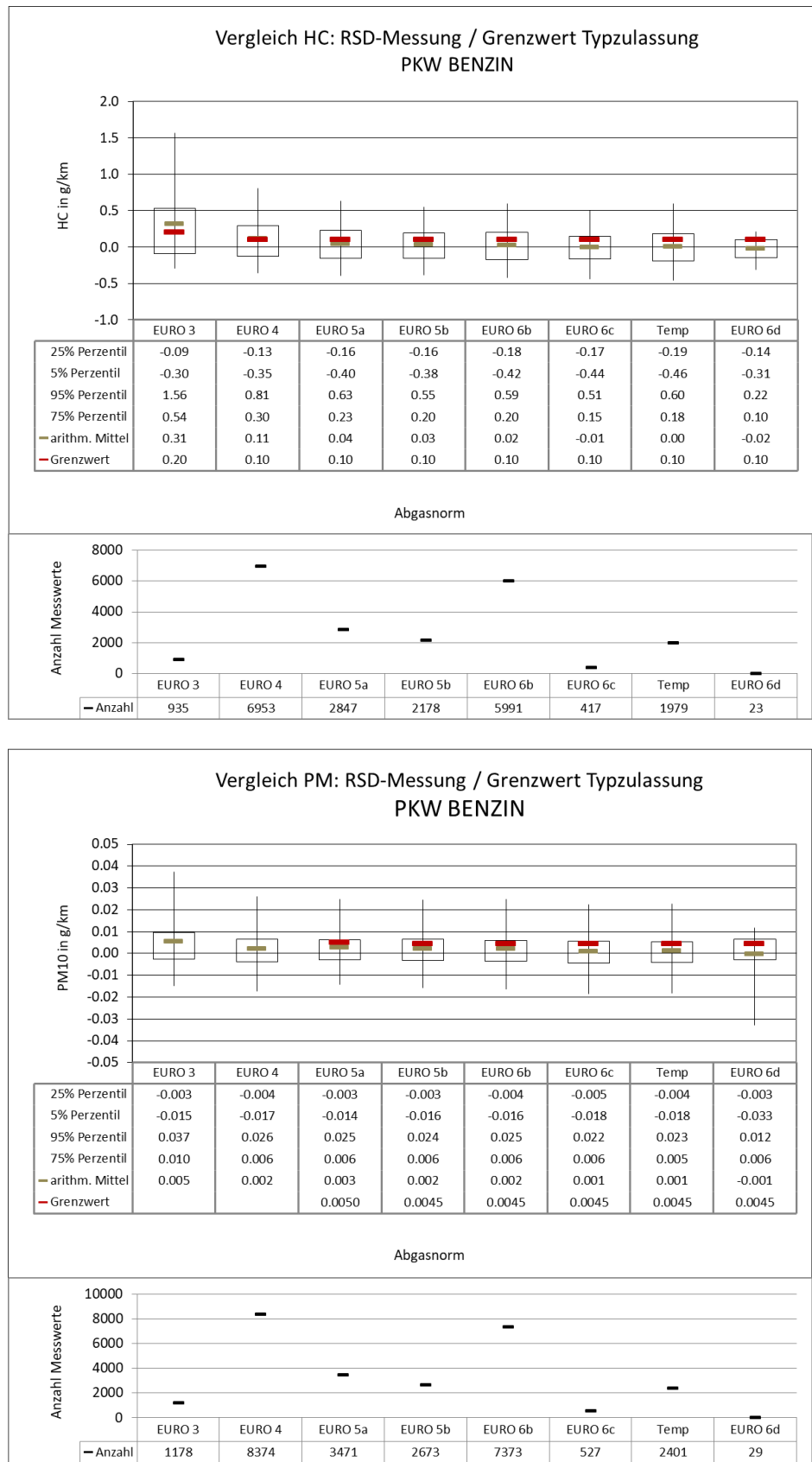
- CIEMAT (Center for Energy, Environmental and Technological Research of Spain), Year 2015.
- IVL (Swedish Environmental Research Institute), Year 2016.
- JRC (European Commission's Joint Research Centre), Year 2017.
- ICCT (International Council on Clean Transportation), Year 2018.
- RICARDO E&E, Year 2018.
- Applus+ IDIADA, Year 2018.

**A N H A N G A2:**  
**VERGLEICH: RSD-MESSUNG / GRENZWERT TYPZULASSUNG**  
**FÜR ALLE REGLEMENTIERTEN SCHADSTOFFE**

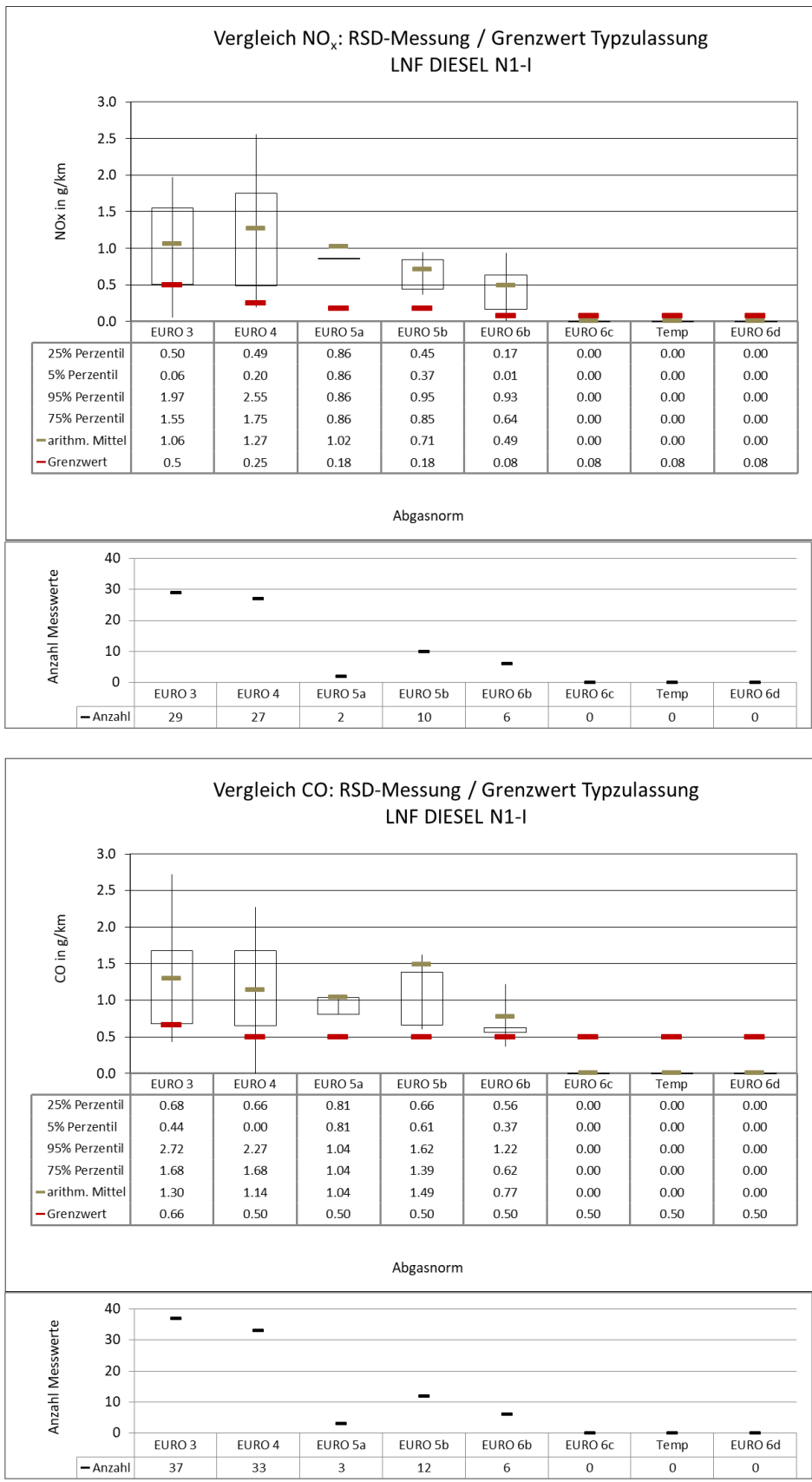


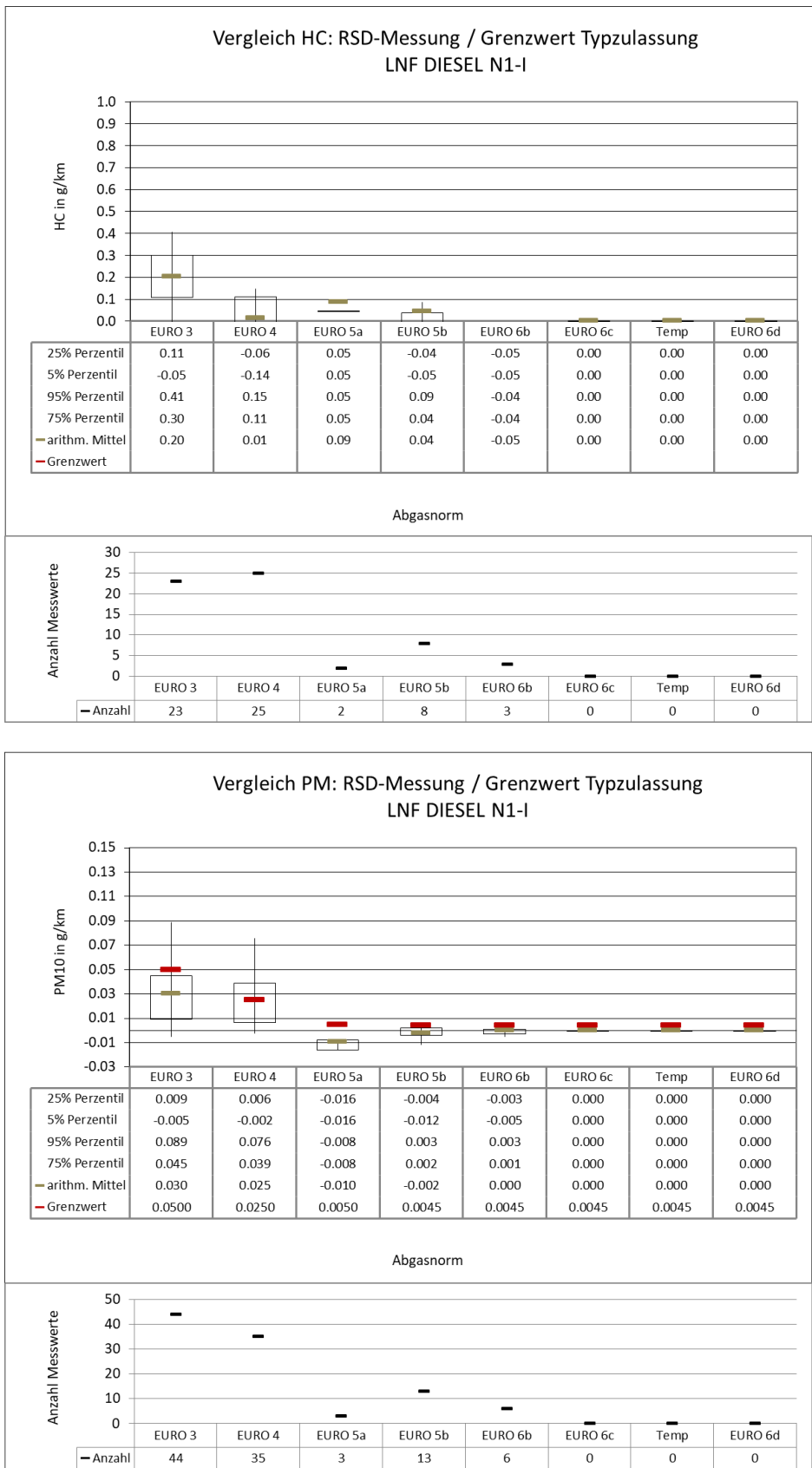


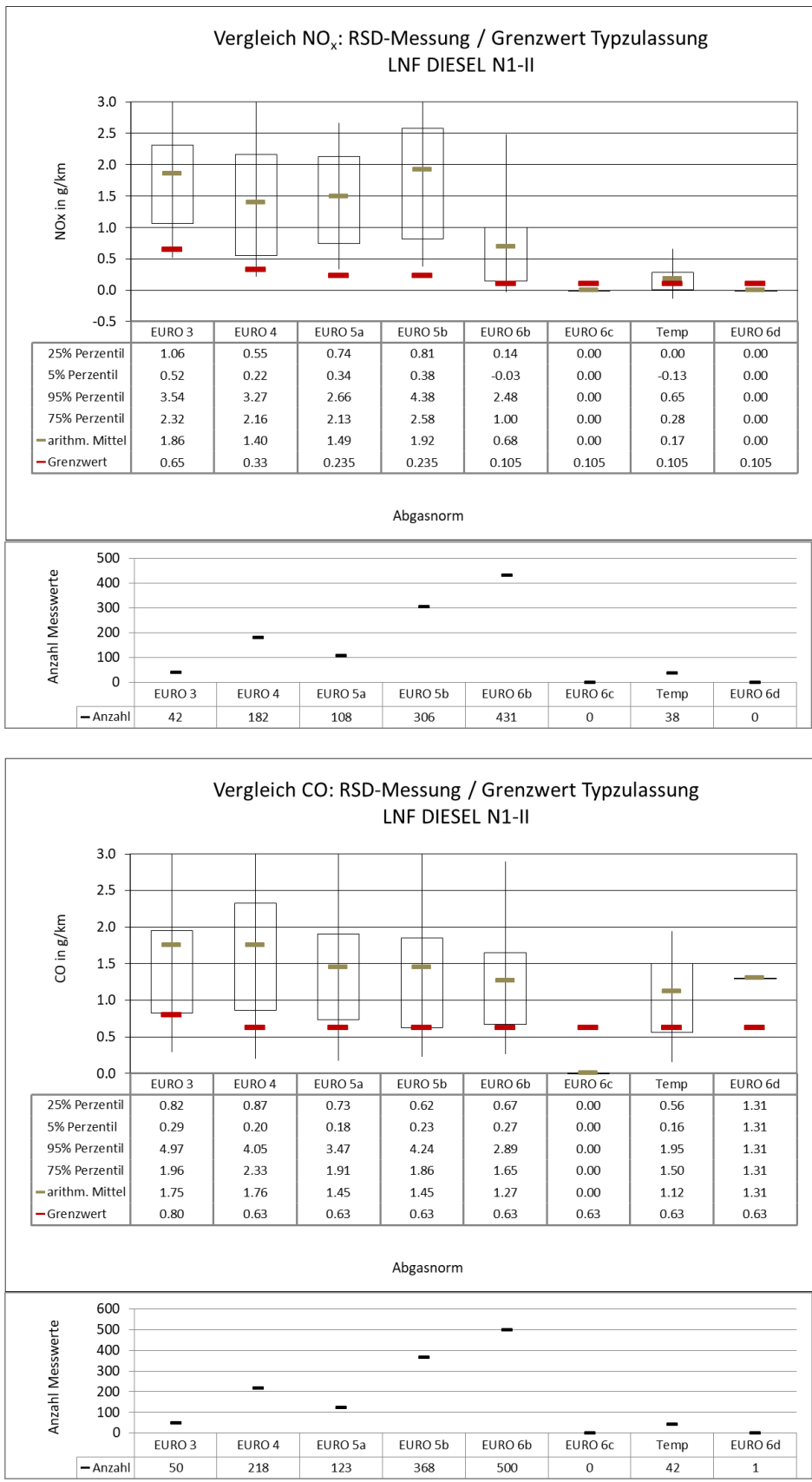


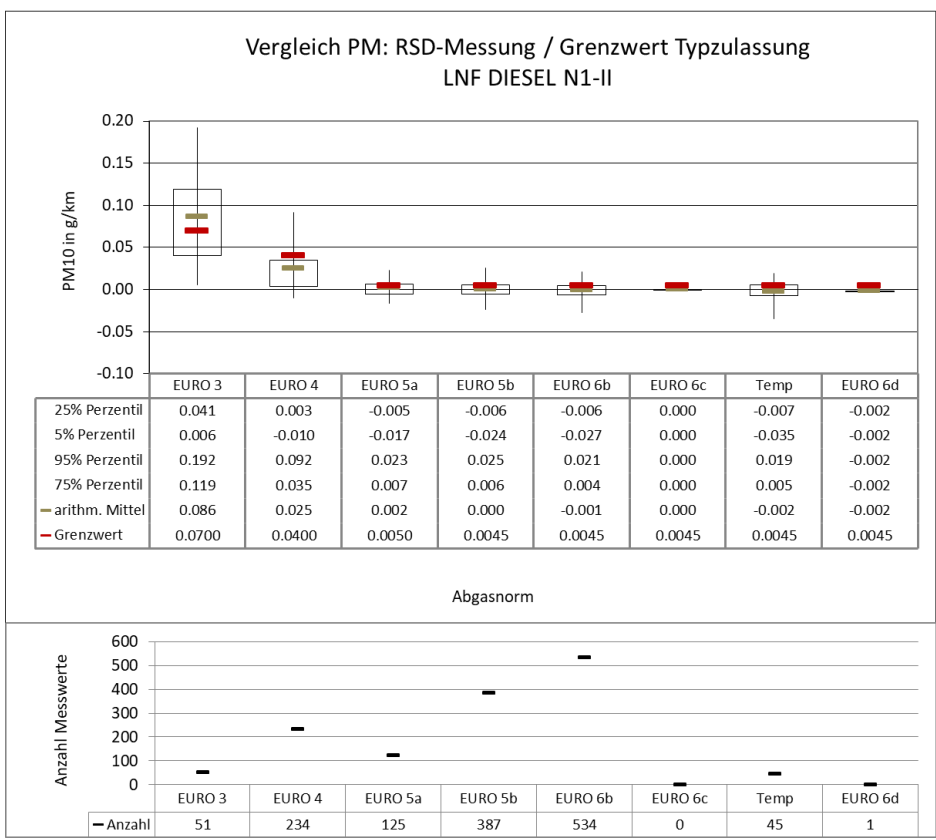
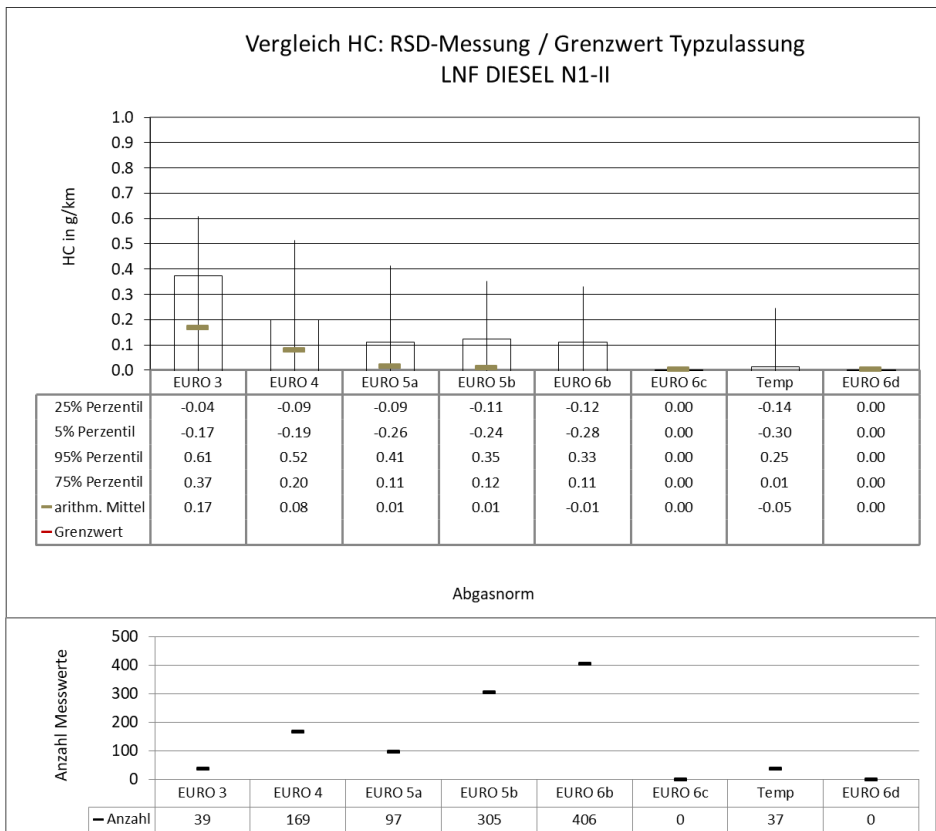


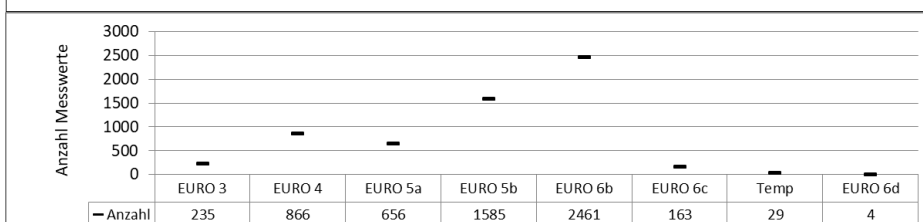
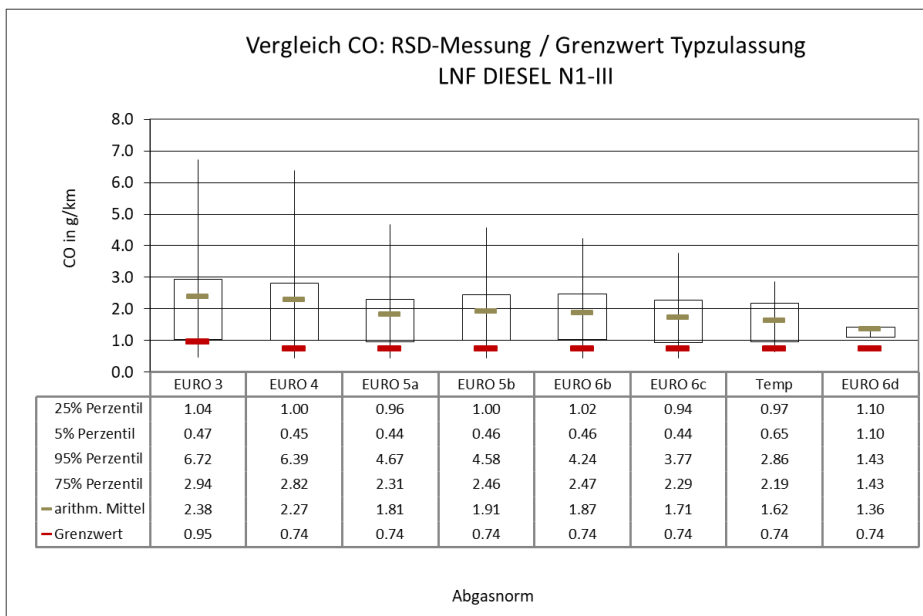
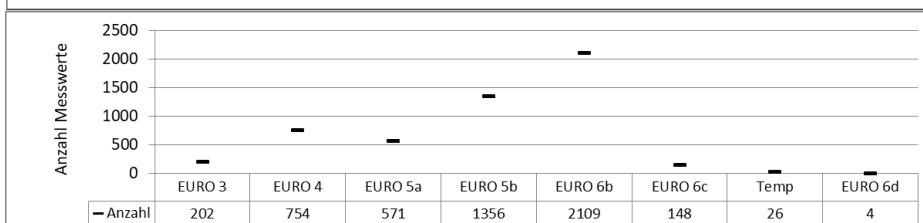
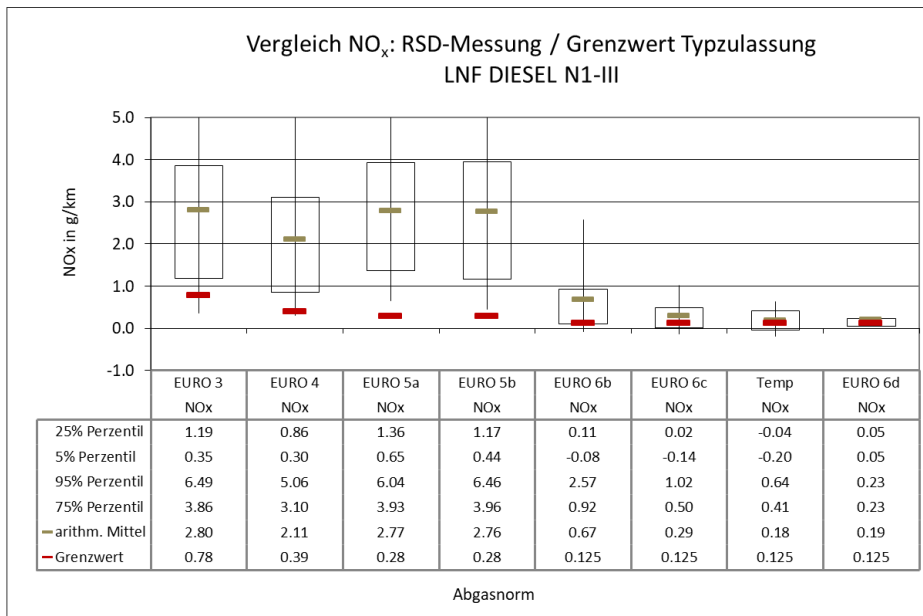


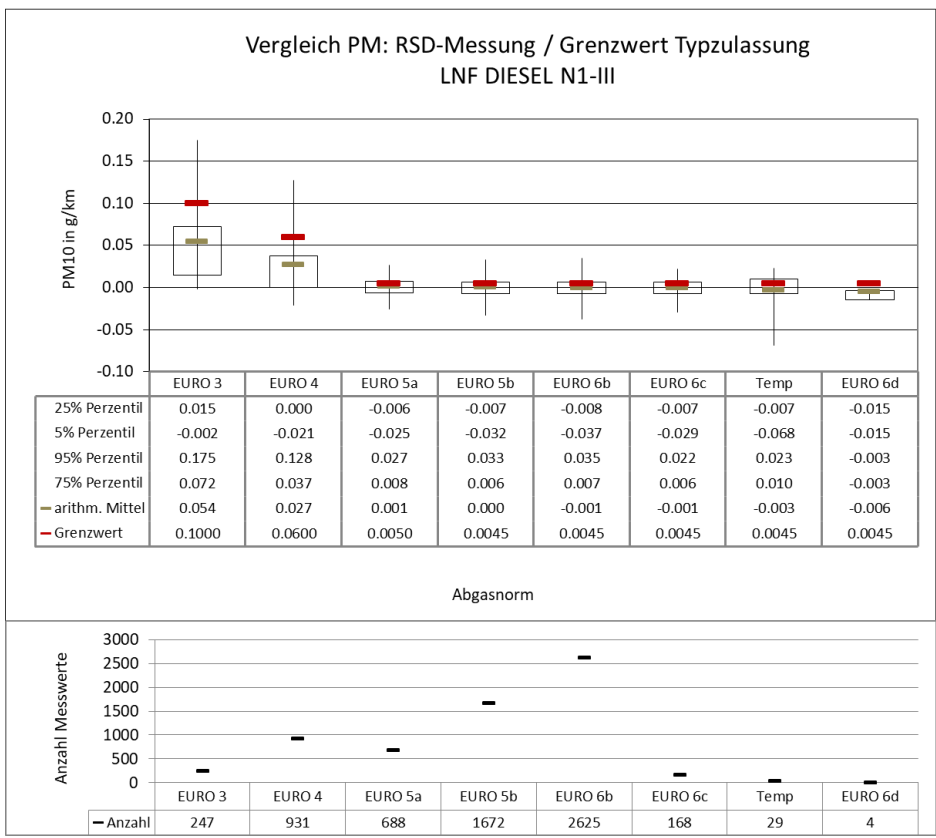
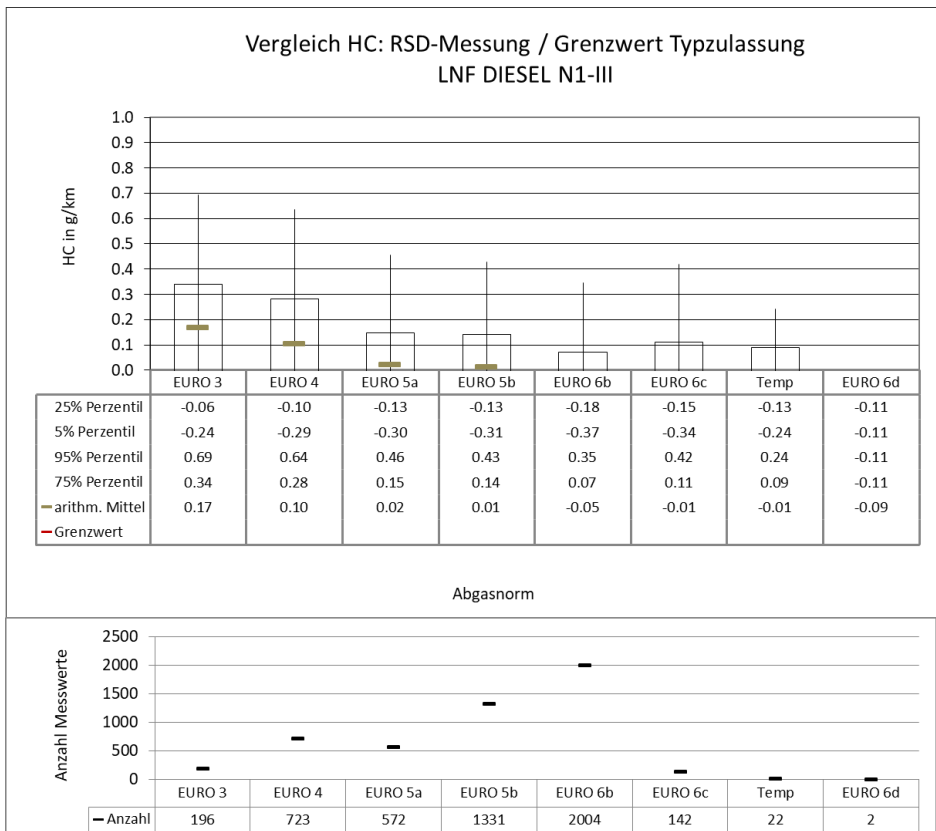


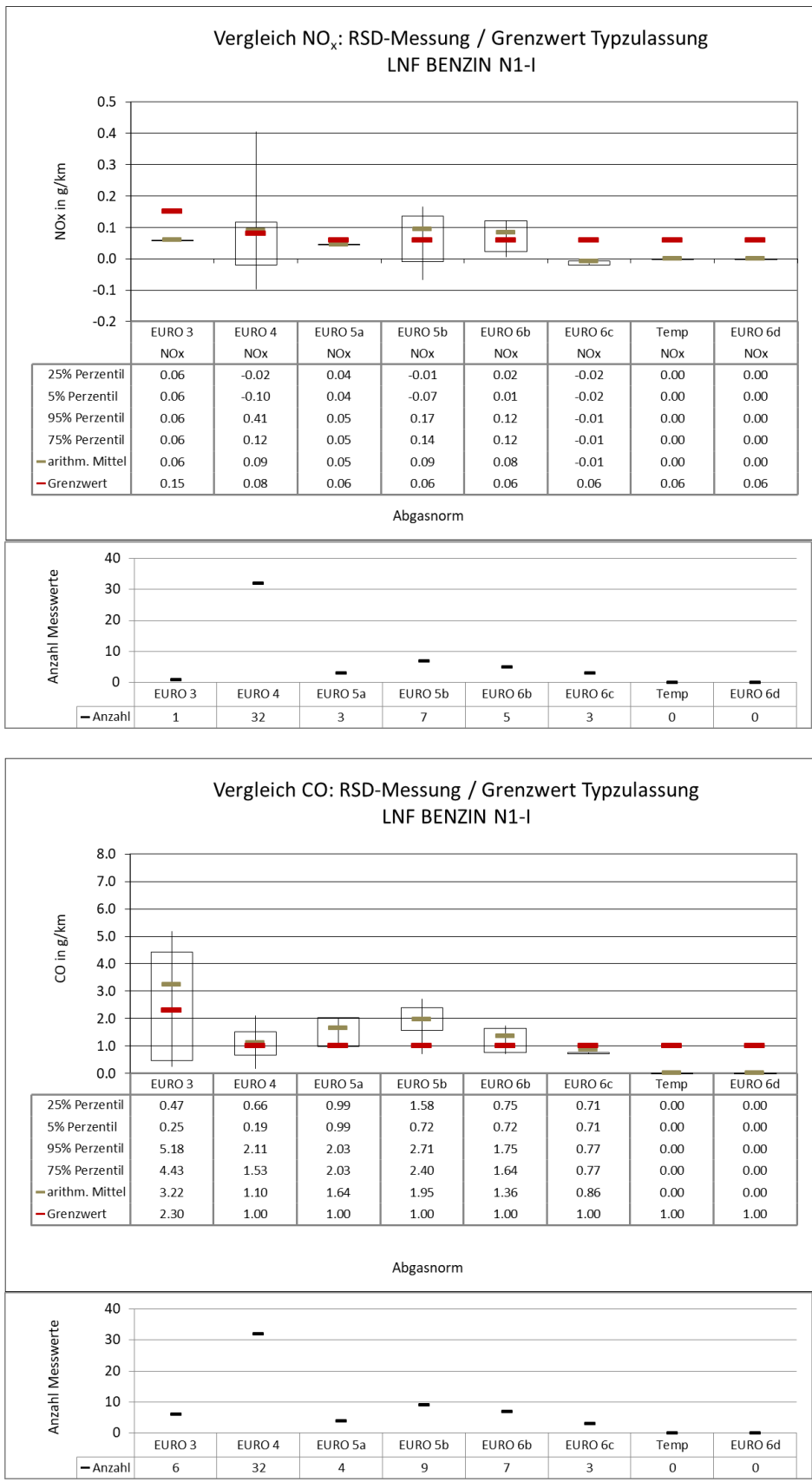


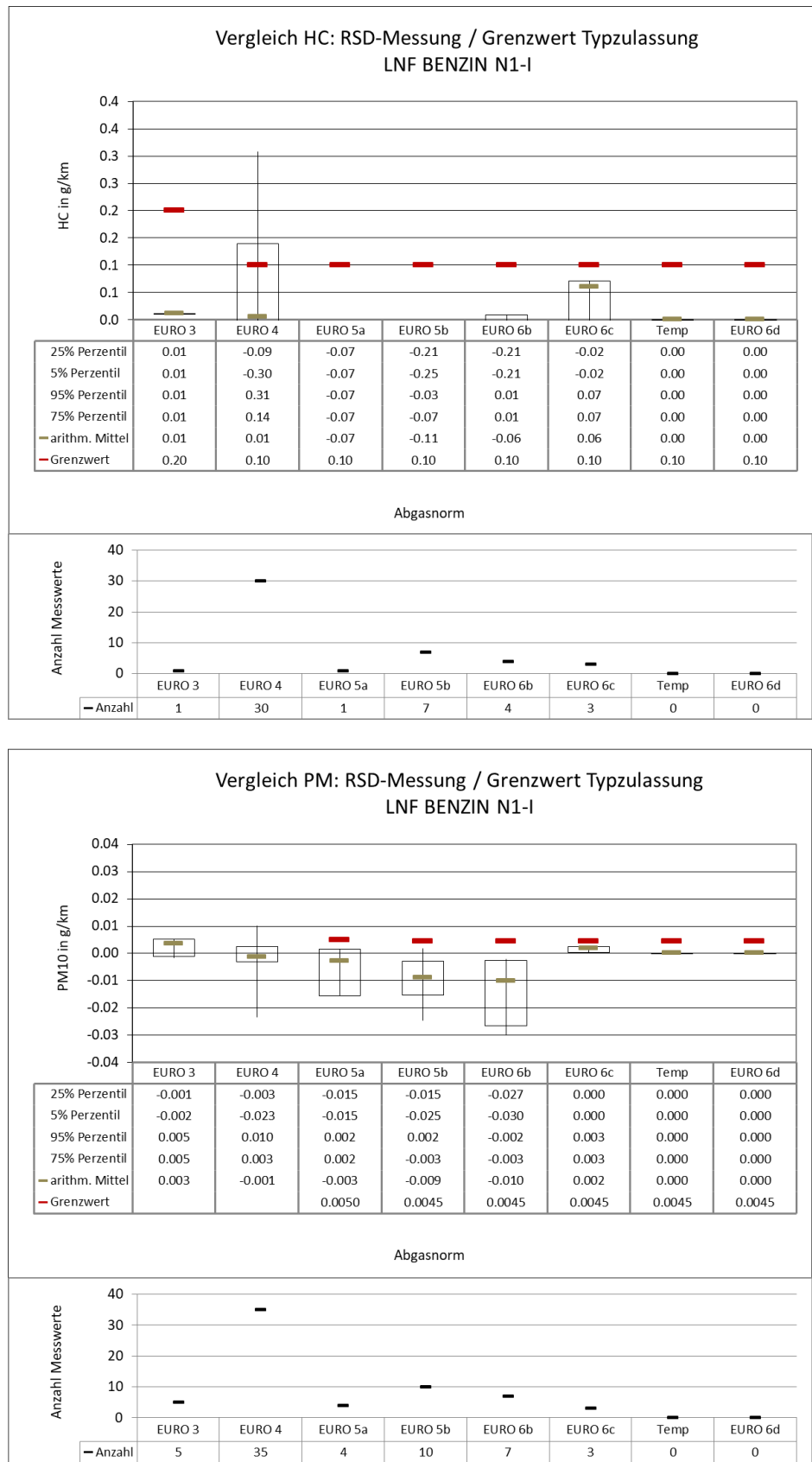




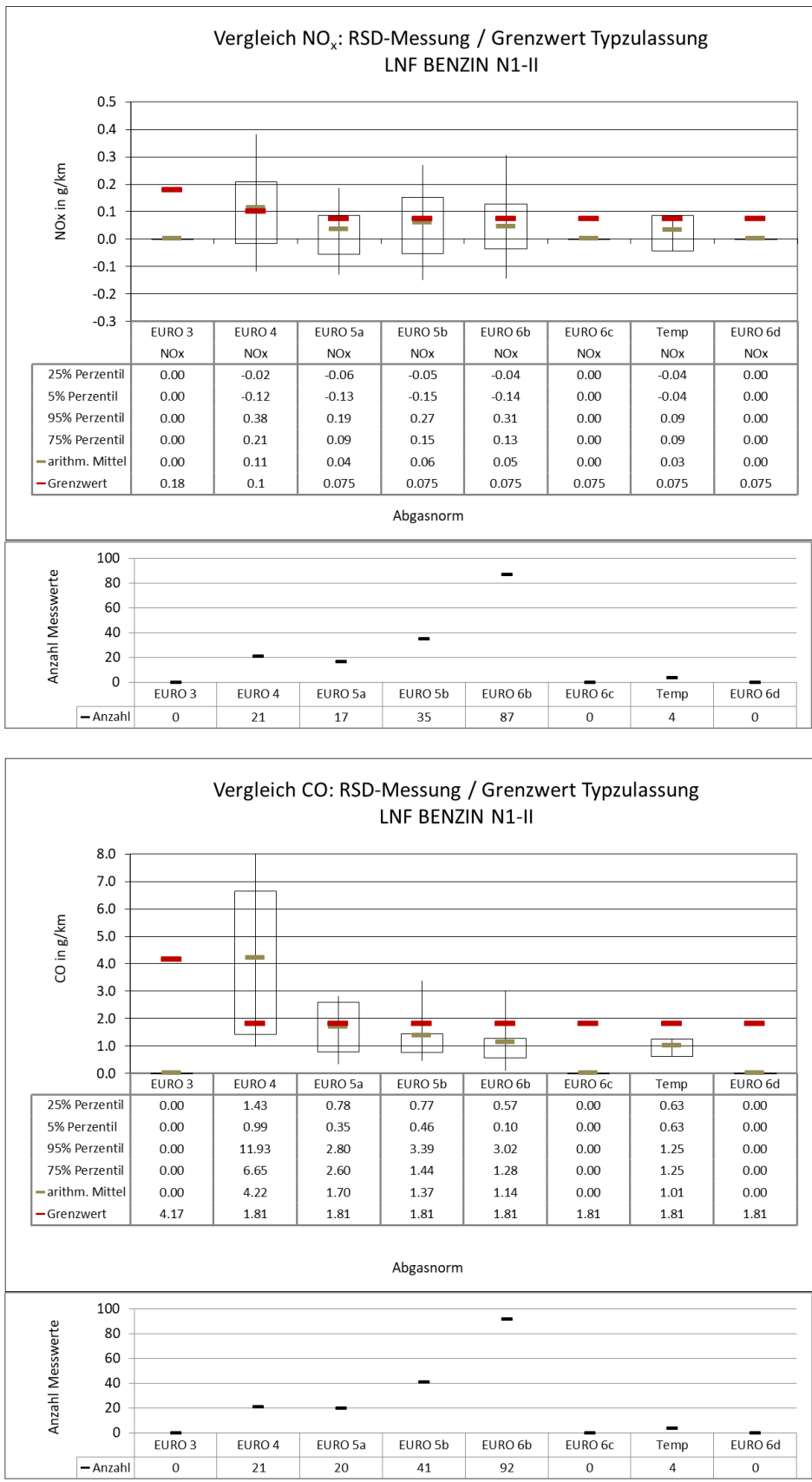


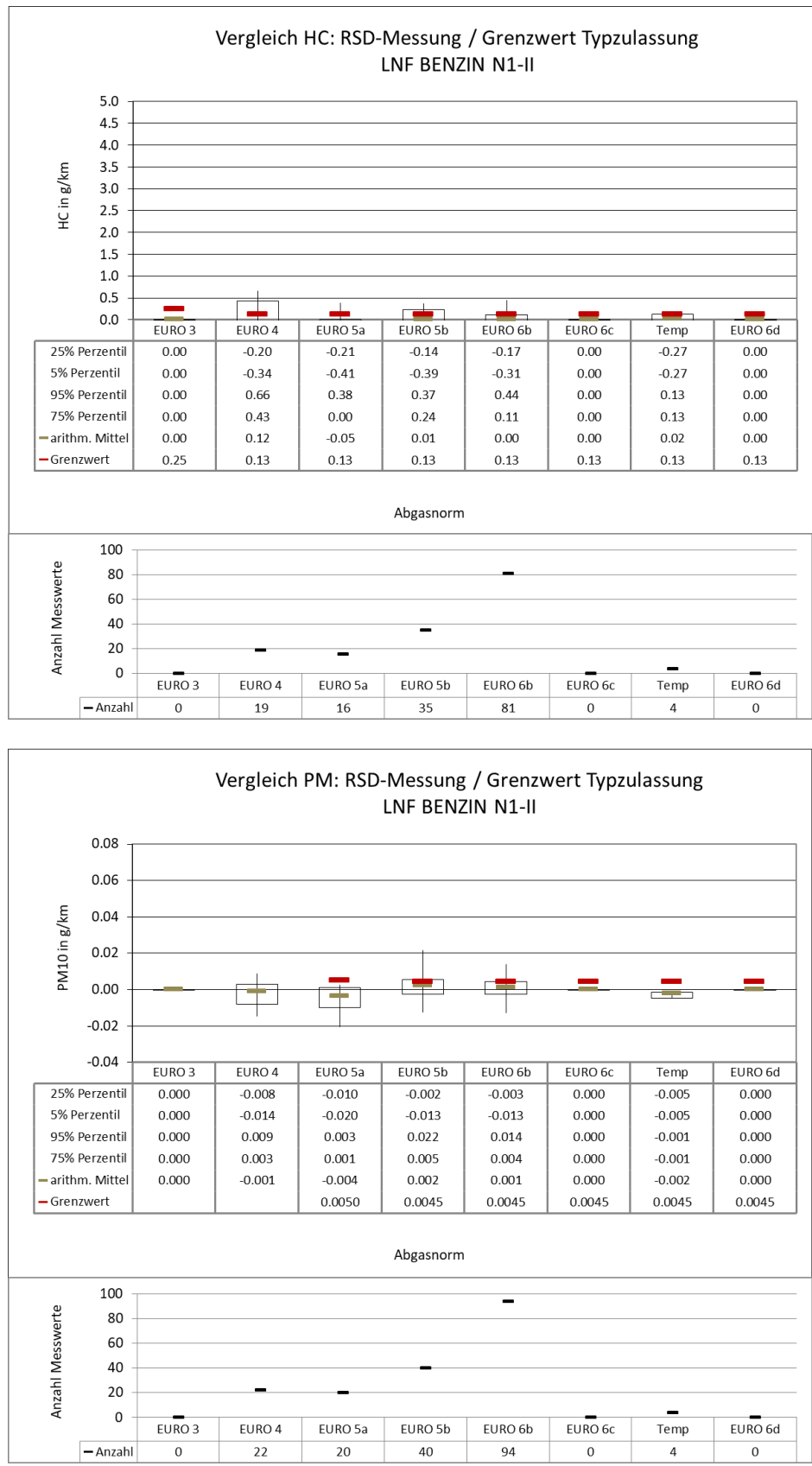


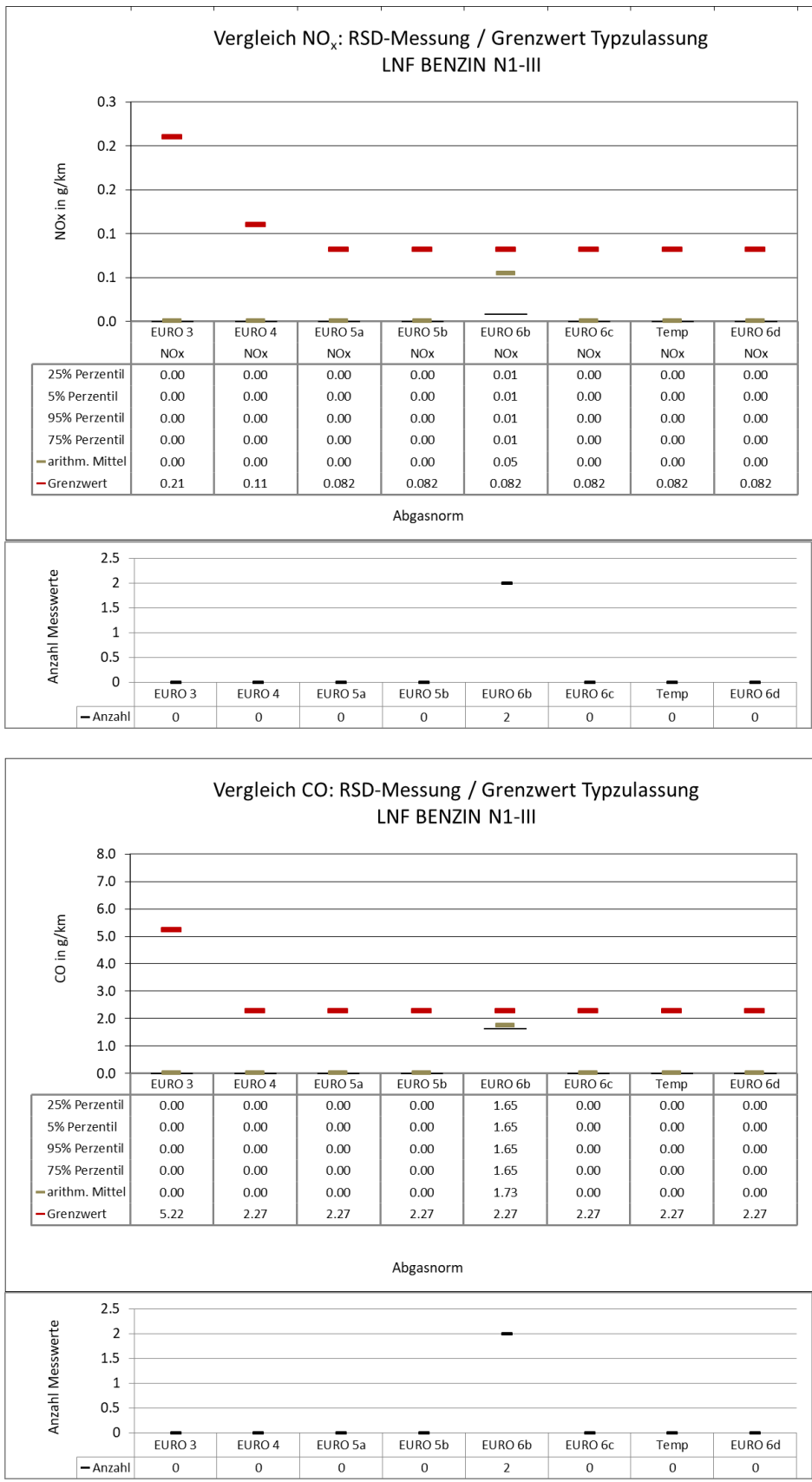


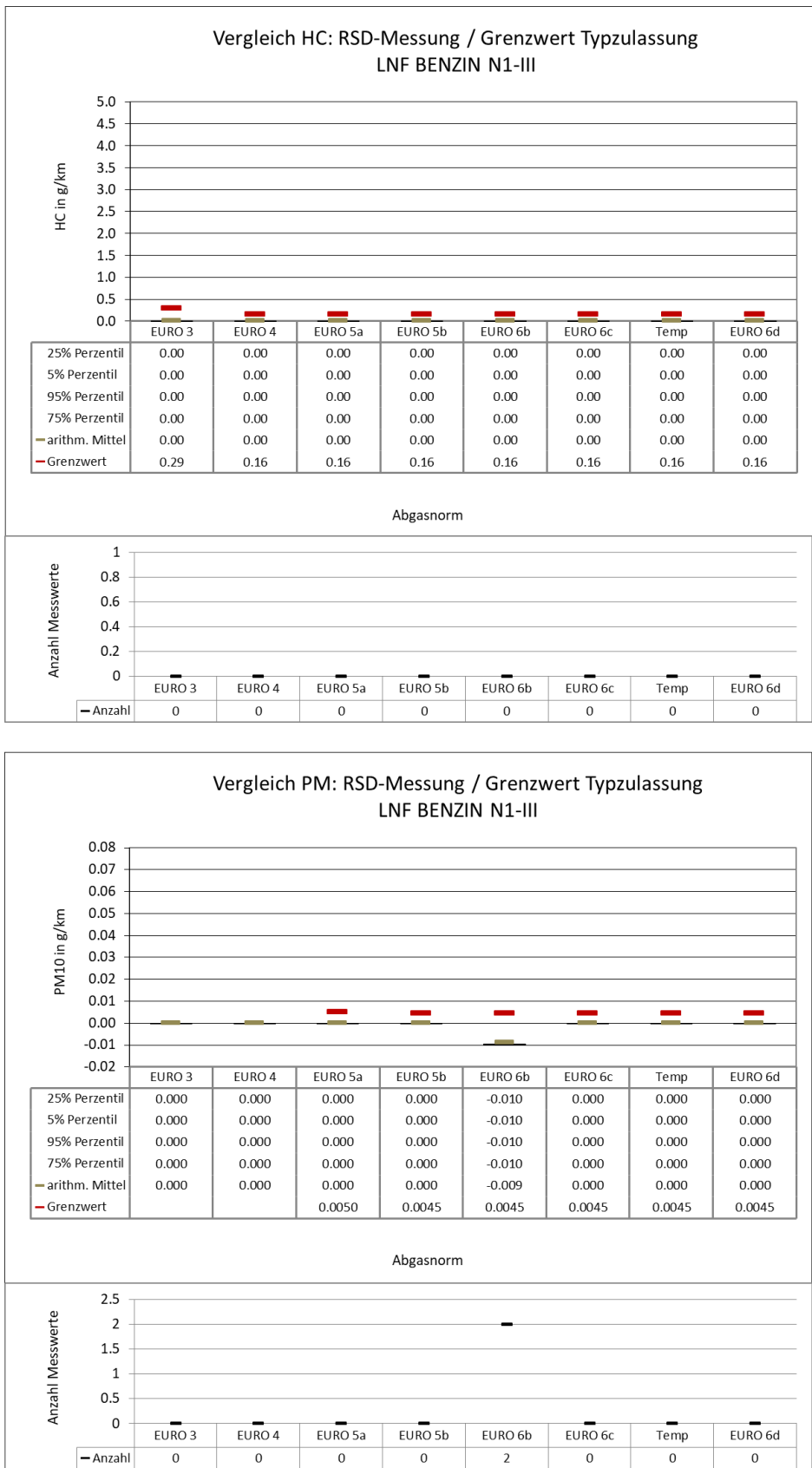


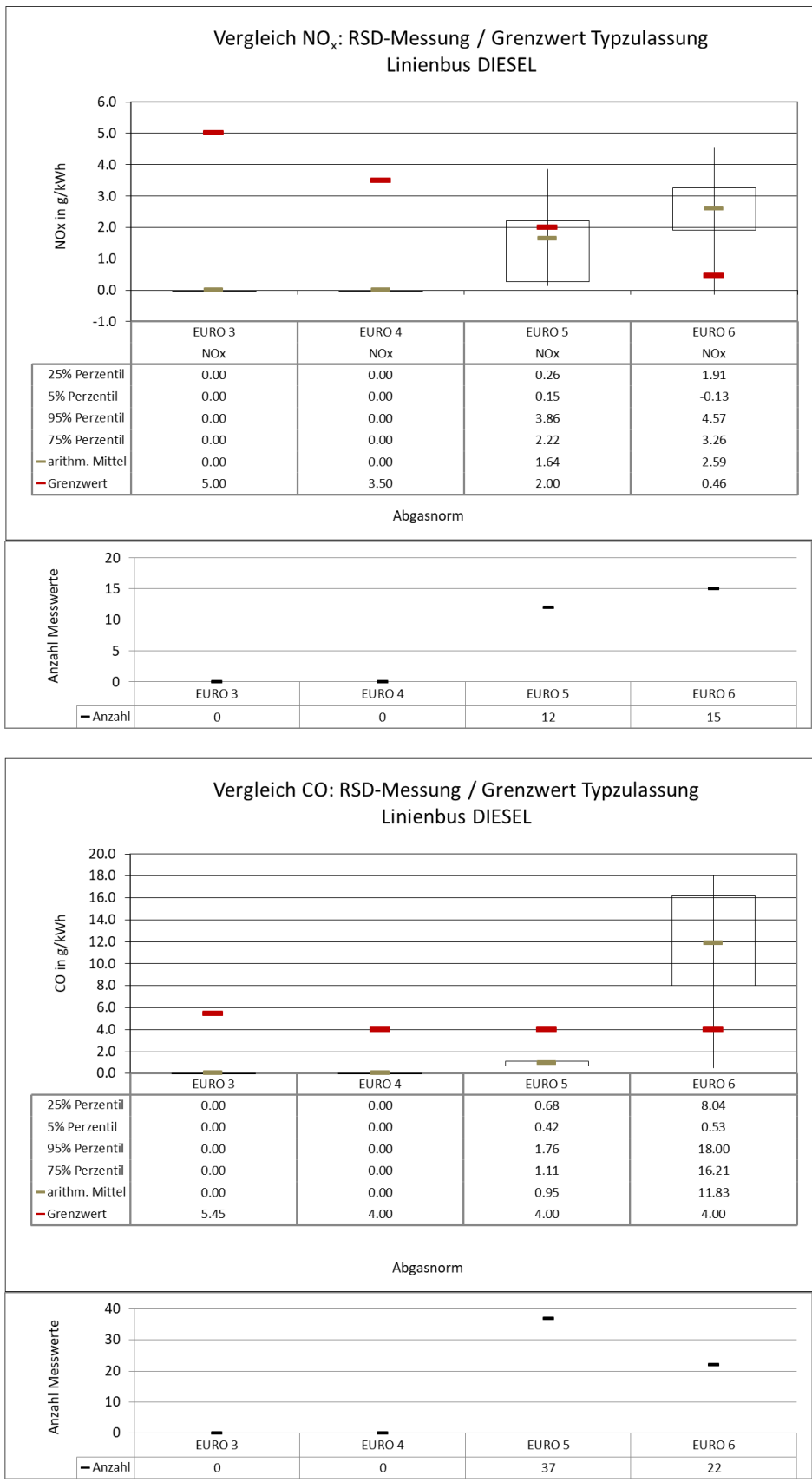


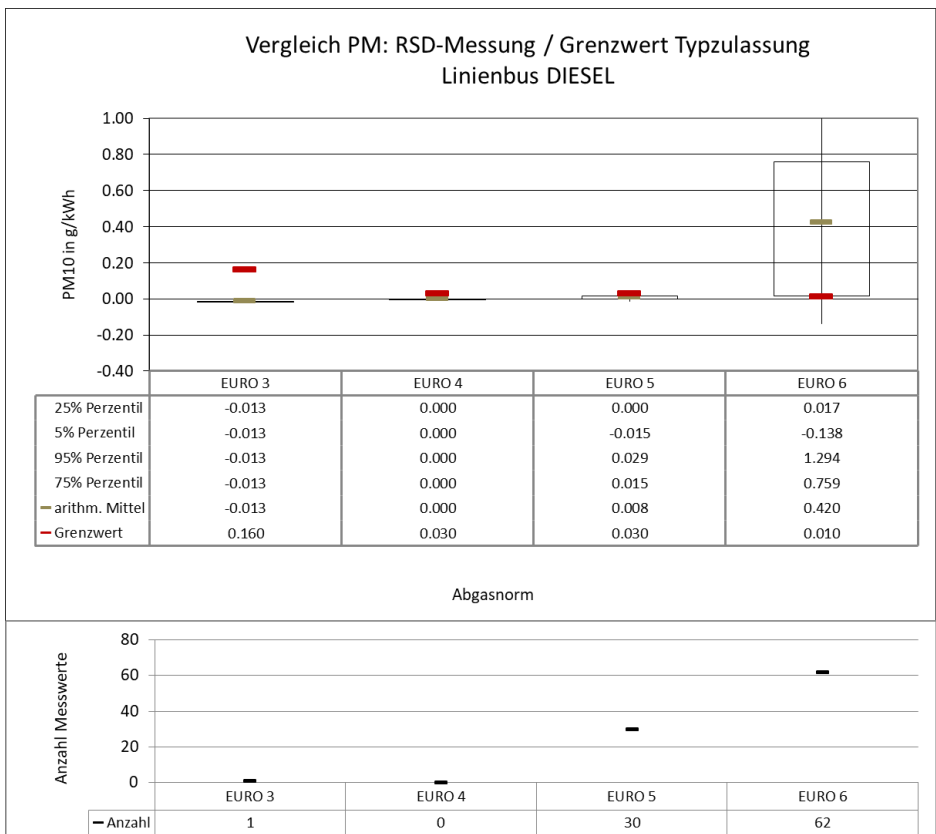
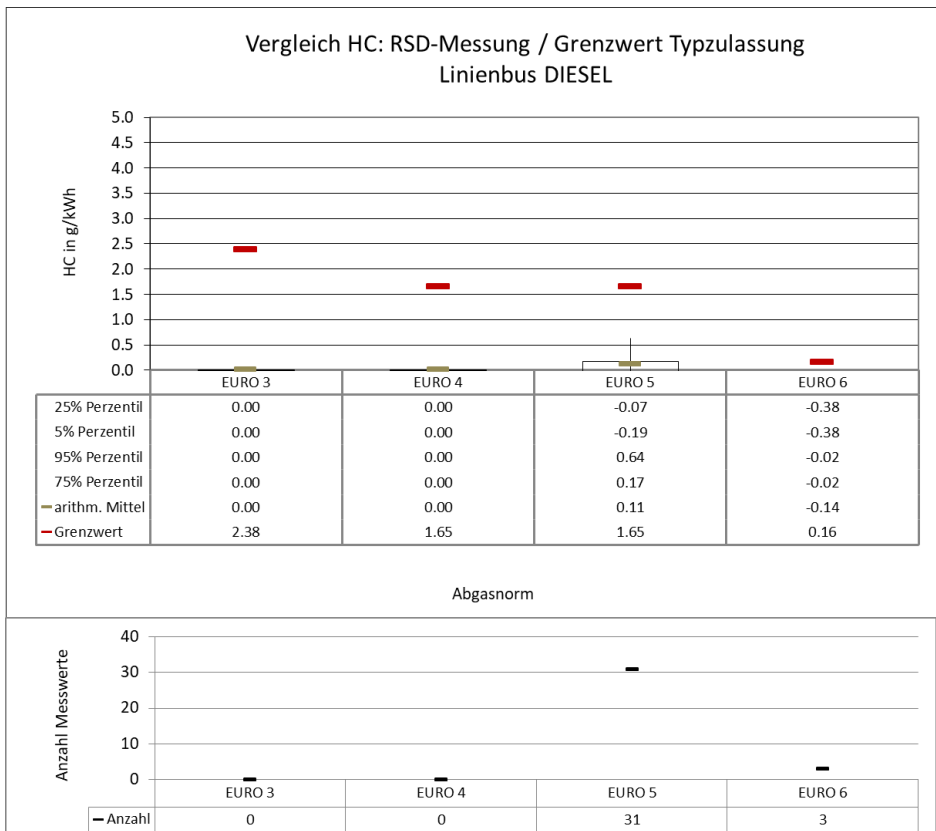


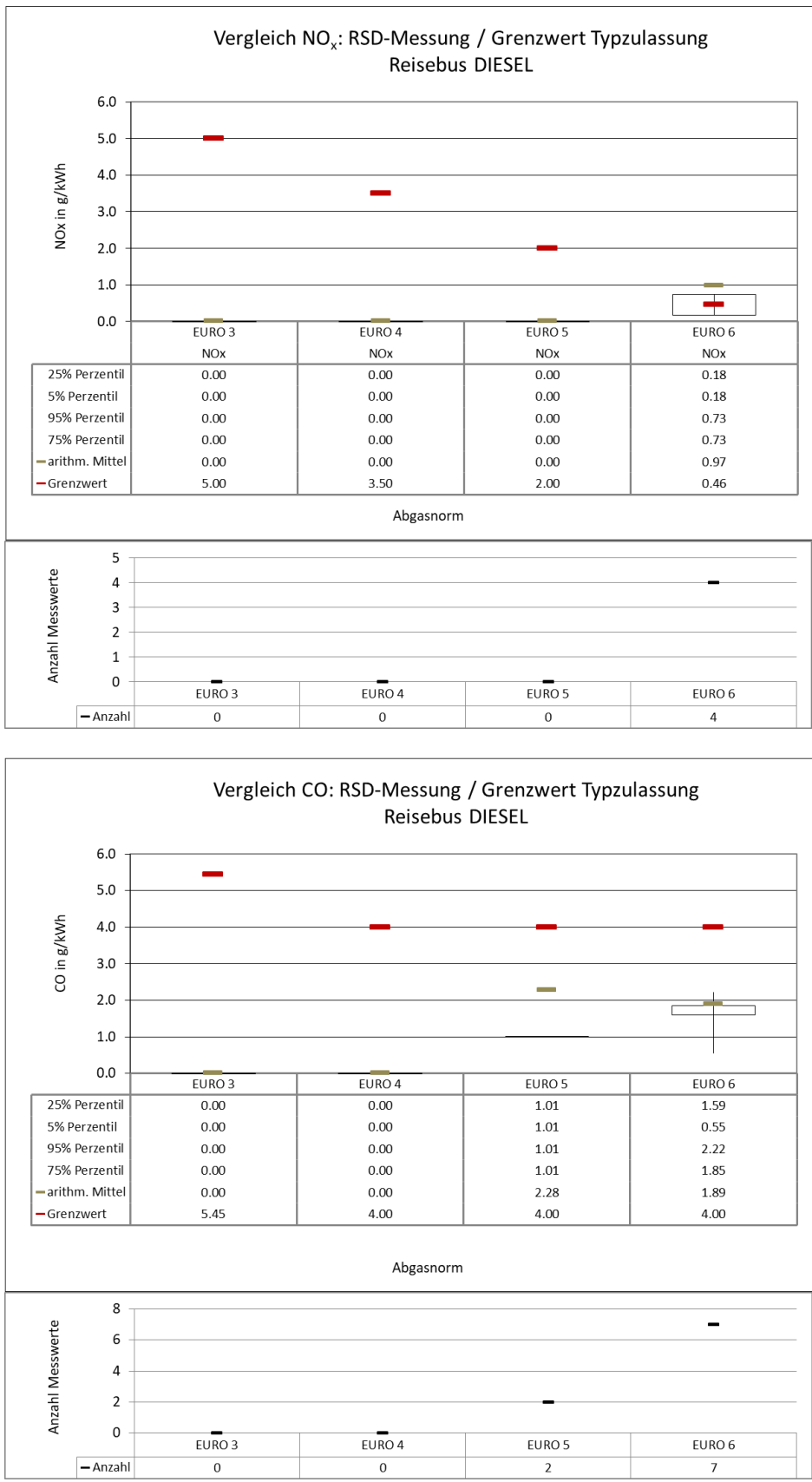


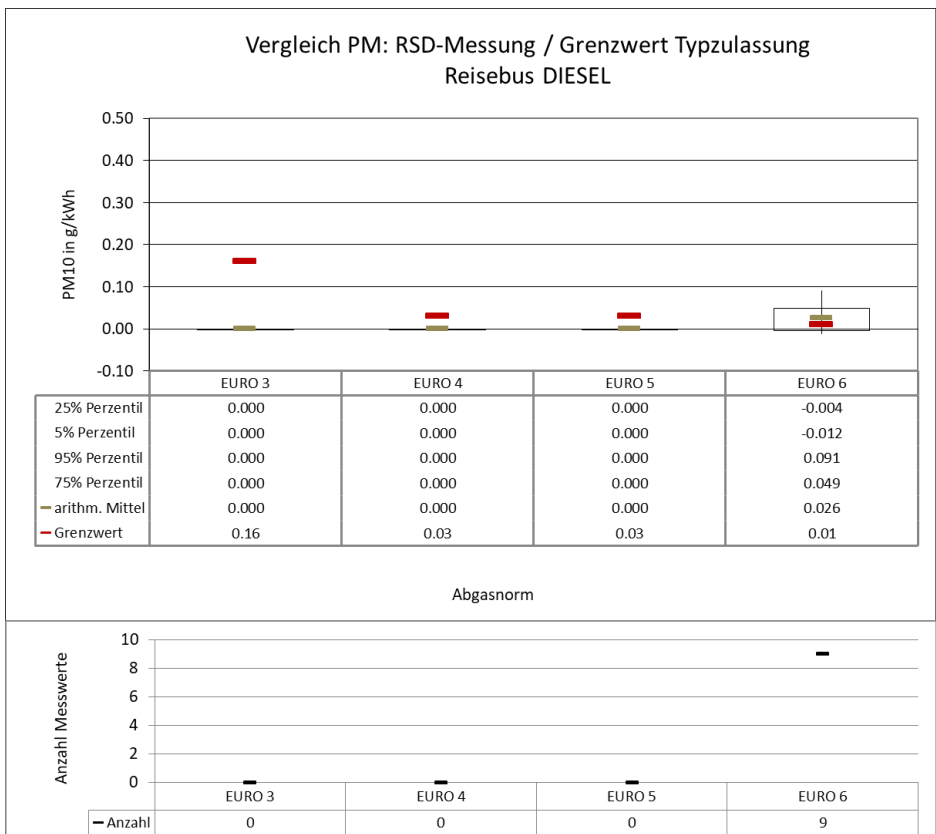
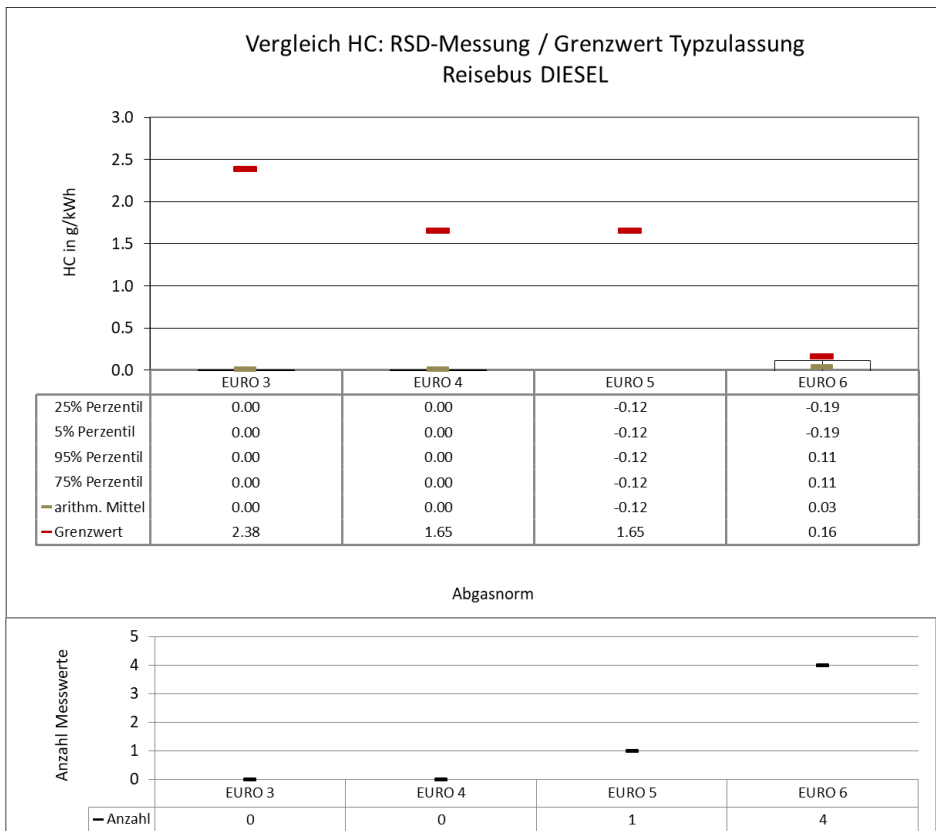




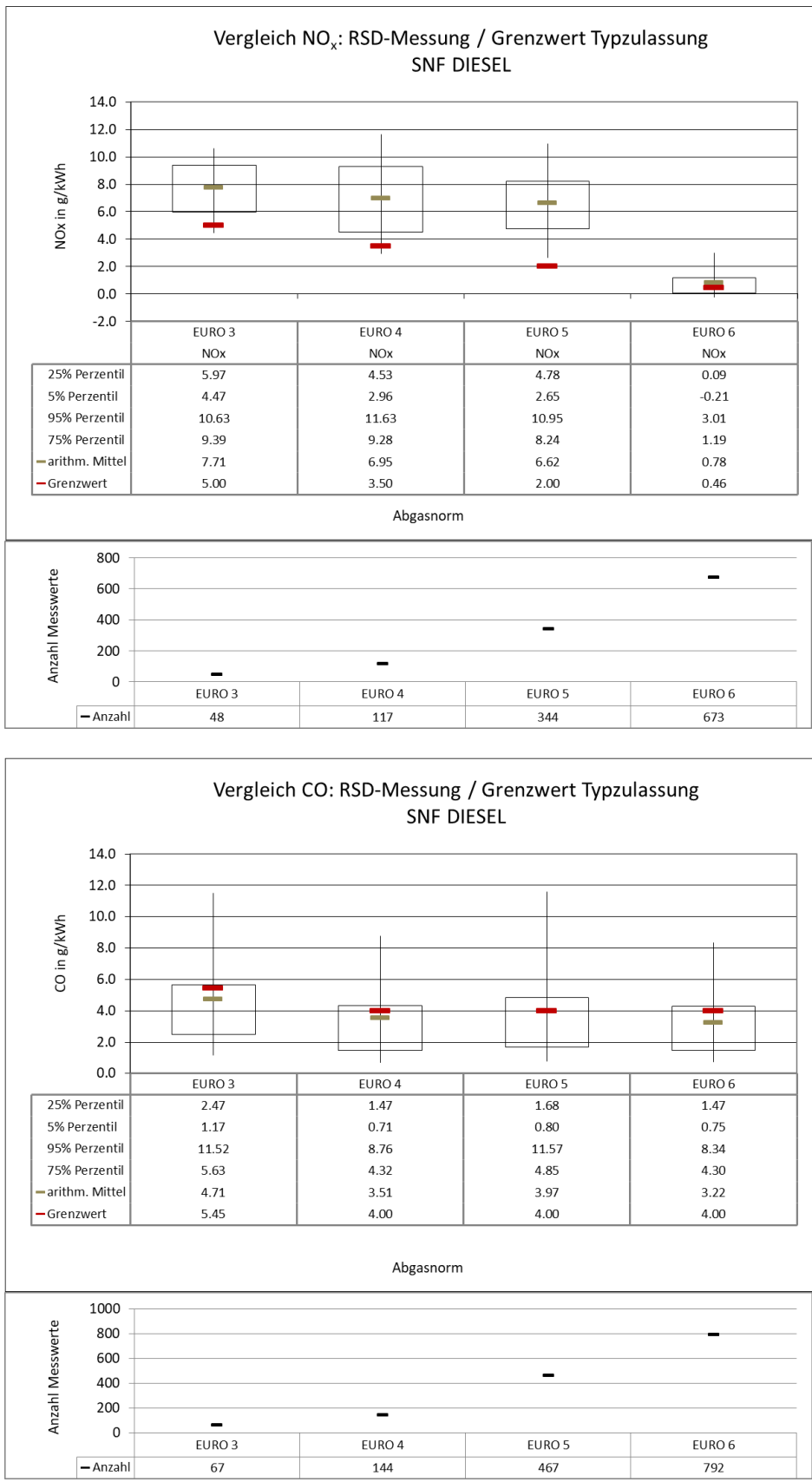


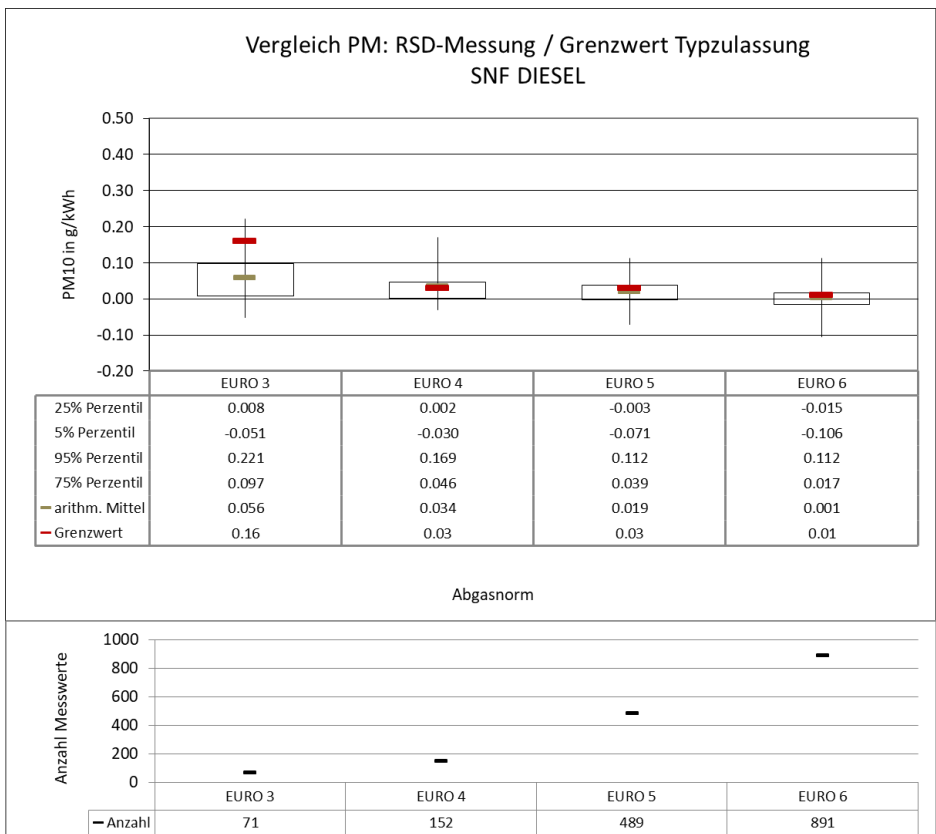
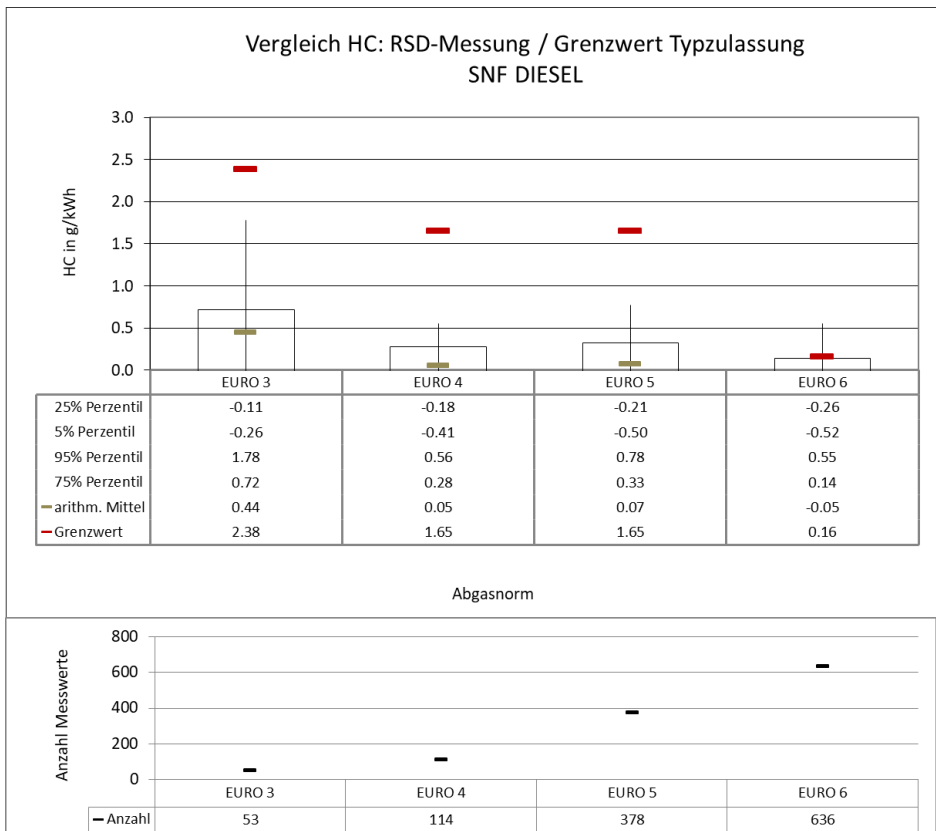












**A N H A N G A3:**  
**SIMULATION OF FUEL FLOW FROM VEHICLE SPEED AND ACCELERATION**  
**DATA**

Horizon 2020 CAREs

**Part:**  
**Simulation of fuel flow from vehicle speed  
and acceleration data**

Stefan Hausberger, TU Graz

DRAFT Version 1

Graz, 08.01.2020

**Abbreviations**

<b>CADC</b>	<b>Common Artemis Driving Cycle</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Carbon dioxide</b>
<b>ERMES</b>	<b>European Research Group on Mobile Emission Sources</b>
<b>HBEFA</b>	<b>Handbook of Emissions Factors</b>
<b>kW/t</b>	<b>Kilowatts per metric ton, the units of measurement for vehicle specific power</b>
<b>NEDC</b>	<b>New European Driving Cycle</b>
<b>PHEM</b>	<b>Passenger Car and Heavy Duty Emission Model</b>
<b>RS</b>	<b>Remote Sensing</b>
<b>VSP</b>	<b>Vehicle Specific Power; engine power at driving situation divided by the mass of the vehicle in [kW/ton]</b>
<b>WLTP</b>	<b>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure</b>

## 1. Introduction

This report describes the development of a simple set of equations for estimates of VSP and of fuel flows based on simulations with the vehicle emission model PHEM and the HBEFA 4.1 data set for vehicle and engine technologies. The equations are designed to be applied to convert remote sensing results from [g/kgCO<sub>2</sub>] into [g/km]. This section and the model have been developed by Stefan Hausberger (TUG).

The report is an update of the work started in the CONOX project, (Borken-Kleefeld, 2018). The updates consider:

- 1) The replacement of vehicle segments by vehicle empty mass in the equations
- 2) The adjustments of all generic parameters to the recently published data set from HBEFA 1.1 (Matzer, 2019)

The adjustments in 1) were made for a simpler handling of the equations since from remote sensing typically the vehicle make and model and thus the vehicle reference mass is available but no link to the vehicle segment.

The adjustments to the HBEFA 4.1 data result in higher engine power demands in real driving since in HBEFA effects from rain, wet roads, winter tires, roof boxes etc. were **considered**.

## 2. VSP and Fuel Consumption

### 2.1 VSP

The VSP can be computed for a given driving situation (velocity and acceleration) from a standardized VSP equation. The equation was elaborated from the basic longitudinal dynamics equations below.

The engine power necessary during a driving cycle can be computed from the main power consumers quite accurately as follows:

$$P = P_{accel.} + P_{roll} + P_{air} + P_{grad} + P_{transmission} + P_{aux}$$

For a simple approach following assumptions are made:

- The power to accelerate rotational accelerated mass is equivalent to 6% of the power for translational accelerated mass.
- The loading of the vehicle is 15% of the vehicle empty mass for cars and LCVs (e.g. 180 kg loading of passengers and luggage for a 1200kg empty vehicle weight). If the

loading is known, the generic load factor in Equation 1 can be replaced by the real ratio.

- The losses in the transmission are 8% of the power at the driven wheels (acceleration, rolling resistance, air resistance, gradients go through transmission system). In the case of energy flow from the wheel to the engine (braking by the engine) the losses also would change the direction. As simplification this effect is not considered here since it is only relevant in VSP areas below zero where no fuel is consumed.
- The auxiliaries need on average in real driving 1700 W power for cars and LCVs.

The engine power demand is then in [W]:

$$P = [m_{total} * a * 1.06 + R_0 + R_1 * v + Cd * A * 0.6 * v^2 + m_{total} * g * Grad] * 1.08 * v + 1700$$

With:

$m_{total}$  ..... total vehicle mass, i.e. empty mass + loading in [kg]

Grad ..... gradient, defined as altitude[m] / distance [m]

For the VSP in kW/ton follows:

**Equation 1:** 
$$VSP = \frac{(1700 + R_0 * v + R_1 * v^2 + C_d * A * 0.6 * v^3) * 1.08}{m * 1000} + v * 1.08 * [LF * 1.06 * a + LF * g * Grad]$$

With

VSP..... vehicle specific power [kW/ton]

m..... vehicle empty mass in [t]

the empty vehicle mass is the DIN mass (DIN-mass = EU-mass -75kg)

Attention: the vehicle reference mass in the NEDC test is  $m_{DIN} + 100\text{kg}$ , you should check which values you have as basis.

LF..... Load factor, ratio of total mass to vehicle empty mass, a value of 1.15 is suggested as generic setting

a..... vehicle acceleration [ $\text{m/s}^2$ ]

v..... vehicle speed [m/s]

Consequently, with a known speed, acceleration and gradient measured by RSD and the driving resistance parameters of the vehicle the actual VSP of a vehicle can be calculated.

If the vehicle road load data is not available, generic values can be applied. For a simple application, the generic values were elaborated as function of the empty vehicle mass from the test data base used also for the HBEFA. Depending on the vehicle segment (small cars to SUVs) the real driving resistance parameters may deviate by several percent from the generic values.

The parameters in  $R_1 = m \times A_1 + B_1$

$$C_d * A = m \times A_2 + B_2$$

Table 1 shall be applied in following equations to calculate  $R_0$ ,  $R_1$  and  $C_d * A$  as input for Equation 1:

$$R_0 = m \times A_0 + B_0$$

$$R_1 = m \times A_1 + B_1$$

$$C_d * A = m \times A_2 + B_2$$

**Table 1: Generic data suggested to be used per vehicle segment or for average cars and LCVs if no specific vehicle data is available**

	A0	B0	A1	B1	A2	B2
Diesel car	136	-33.2	0.81	0.08	0.62	-0.20
Diesel LCV	114	11.0	0.97	0.03	0.77	0.04
Gasoline car	130.4	-28.9	0.76	0.05	0.62	0.007
Gasoline LCV	112.6	12.0	0.95	0.05	0.80	-0.020

## 2.2 FUEL Consumption

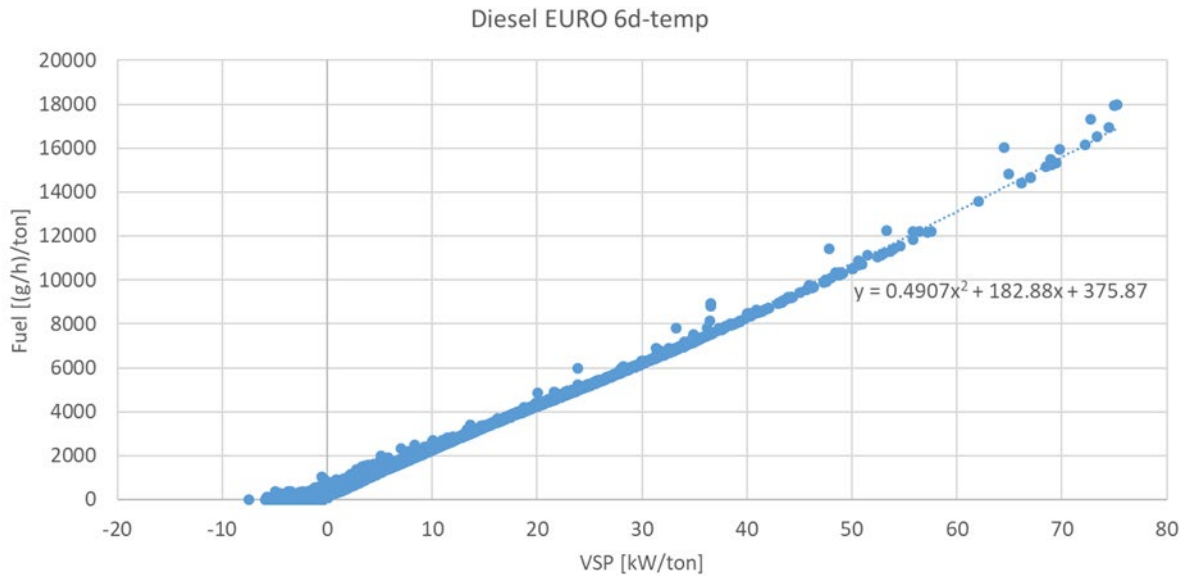
To be in the position to produce fuel consumption values representative for specific, short driving situations, PHEM HBEFA 4.1 results for average cars have been used to set up characteristic fuel flow curves for different engines.

The model PHEM simulates fuel consumption and emissions from vehicles in any driving situation based on engine maps and vehicle longitudinal dynamics simulation. Thus, PHEM can produce representative fuel consumption values for various driving conditions in 1Hz resolution. More detailed descriptions are given e.g. in (Matzer, 2019), (Hausberger, 2012) and in the user manual.

Since the current engine speed is not known from RS measurements, the characteristic fuel flow curves are defined as function of the engine power only. To fit to the VSP approach for the engine power simulation, both, the fuel flow and the engine power are divided by the vehicle empty weight to produce the normalized characteristic fuel flow curves.



An example for 1Hz fuel consumption values simulated by PHEM for the average Euro 6d-TEMP diesel car of HBEFA 4.1 is shown in Figure 11. For this figure, a typical RDE cycle was simulated with PHEM, including urban, road and motorway sections and also road gradients. This real-world cycle (RWC) meets the average HBEFA driving situations quite well and was thus used to set up all normalized characteristic fuel flow curves. The RWC length is 102 minutes. The simulated fuel flow per ton vehicle weight in 1 Hz is plotted over the actual VSP.



**Figure 11: Fuel consumption characteristic curve for the average Euro 6 diesel car, C-segment from PHEM from the 1Hz CADC simulation**

As already shown in (Borken-Kleefeld, 2018), the fuel consumption characteristic curve is quite similar in different test cycles for a given vehicle. This meets the expectations since the engine efficiency mainly depends on engine power and engine speed. The effect of the engine power is fully reflected by the VSP on the x-axis. The influence of engine speed is defined by the gear shift logics. In real driving the gear shift behavior of drivers follows typically a function of torque demand and actual engine speed and thus gives similar engine speed levels over VSP for different real word cycles. The average gear shift behaviour of European drivers however, is not known. PHEM uses a gear shift model developed from various drivers in various vehicles in real world tests described in (Zallinger, 2010). NEDC and WLTP typically result in lower engine speeds and thus a bit lower fuel consumption compared to the characteristic curves presented here.

The normalized characteristic fuel flow curves as shown in Figure 11, have been computed with the model PHEM for gasoline and diesel cars and LCVs. Table 2 summarizes the parameters necessary for the calculation of the fuel flow with following equation:

$$FC = m \times (A * VSP^2 + B * VSP + C)$$

With

VSP ..... vehicle specific power [kW/ton]

m ..... vehicle empty mass in [t]

FC..... Fuels consumption in [g/h]

**Table 2: generic data suggested to be used for average cars and LCVs for the normalized characteristic fuel flow curves**

	A	B	C
Diesel car and LCVs	0.50	183	377
Gasoline cars	-0.025	215	610
Gasoline LCVs	0.71	208	390

The generic parameters listed in Table 1 and Table 2 represent average current vehicle technologies. To calculate the fuel consumption for older Euro classes, the same parameters can be used but the resulting fuel consumption should be adjusted with the parameters listed in Table 3. These parameters were calculated with the model PHEM and the HBEFA 4.1 data set by simulation of the fuel consumption in the real-world cycle (RWC) of all Euro classes. The parameters are simply the ratio to the results for Euro 6d-TEMP vehicles.

**Table 3: Correction factors suggested for the calculation of the fuel consumption from older Euro classes**

	Cars		LCVs	
	Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel
	[fuel consumption ratio to Euro 6d-TEMP]			
Euro 0	1.128	1.14	1.315	1.38
Euro 1	1.079	1.13	1.220	1.30
Euro 2	1.132	1.18	1.243	1.26
Euro 3	1.150	1.04	1.241	1.05
Euro 4	1.133	1.08	1.203	1.04
Euro 5	1.023	1.02	1.080	1.07
Euro 6ab	1.014	1.02	1.035	1.03
Euro 6d-TEMP	1.000	1.00	1.000	1.00

### 2.3 Application of the Method

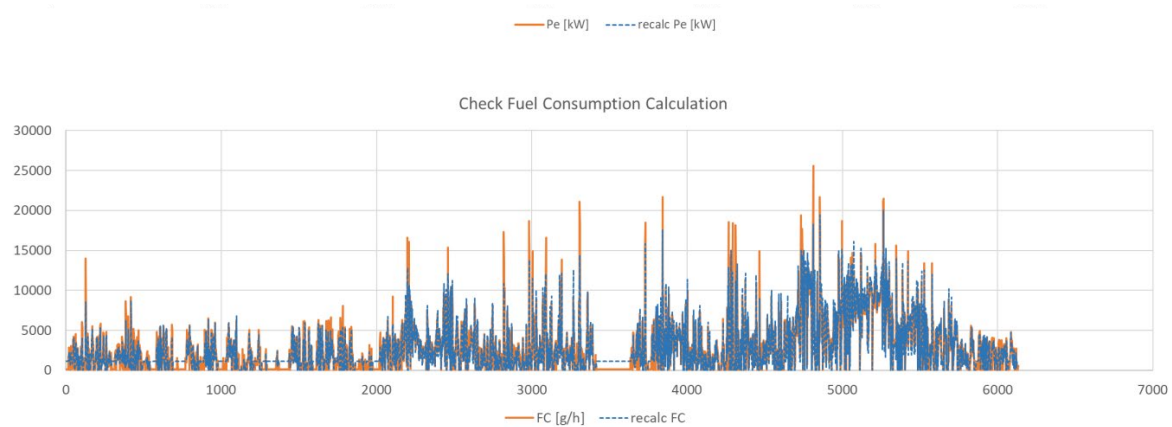
Following steps for the computation process of the fuel flow are necessary when using normalized characteristic fuel flow functions:

1. Calculate the VSP according to Equation 1
2. With the VSP the normalized fuel consumption has to be calculated using the polynomial equation for the fuel consumption characteristic curve (parameters A, B, C as defined in Table 2).
3. Negative fuel flow values gained from the calculation shall be set to zero (VSP values which are below the motoring curve of the vehicle need in reality engagement of the mechanical brake of the vehicle. Mechanical braking leads to extrapolation of the fuel consumption characteristic curve into non existing negative power ranges of engines).  
if  $FC < 0 \rightarrow FC = 0$
4. Division by the actual speed gives the (g/km) fuel flow.

$$\text{Equation 2: } FC \left[ \frac{g}{km} \right] = \frac{FC \left[ \frac{g}{h} \right]}{v \left[ \frac{km}{h} \right]}$$

Figure 12 compares the simulation results using the simplified method shown above with the original PHEM results for a real-world cycle for the average gasoline Euro 6d-TEMP car. The overall deviation was below 2% for all vehicle categories in this cycle. During high accelerations, the power demand and the fuel flow is underestimated by the simplified method, since the rotational inertia of the engine and gear box is only considered as a generic factor in the simplified method. In reality the power demand for rotational acceleration of engine and transmission depends on the transmission ratio and thus on the selected gear.

Furthermore, the simplified method does not consider engine start/stop functions at vehicle stand still. This however, should not be an issue for RS evaluations since remote sensing measurements at vehicles not moving and with engine off is not relevant.



**Figure 12: Comparison of the simulation results for engine power and fuel flow in a real world cycle using the simplified RS method with the original PHEM HBEFA 4.1 results**

Remote Sensing emissions measurements in g/kg of fuel at a specific VSP can be converted in g/s using the result from Equation 2:

$$RS [g/s] = RS [g/kg_{fuel}] * FC [g/h] / 3\,600\,000$$

Consequently, RSD emissions in can be converted into g/km using the fuel flow computed according to Equation 3:

$$RS [g/km] = RS [g/kg_{fuel}] * FC [g/km] / 1\,000$$

**Literature**

J. Borken-Kleefeld, S. Hausberger, Ake Sjödin et.al.: Comparing emission rates derived from remote sensing with PEMS and chassis dynamometer tests; CONOX Task 1 report; Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), Switzerland; IVL, 2018

Matzer C., Weller K., Dippold M., Lipp S., Röck M., Rexeis M., Hausberger S.: Update of emission factors for HBEFA Version 4.1; Final report, I-05/19/CM EM-I-16/26/679 from 09.09.2019, TU Graz; 2019