

***Endbericht zum Projekt:  
Modellentwicklung zur Generierung von  
Emissionsfaktoren für motorisierte Zweiräder***

**FE 84.0521/2015**

Erstellt im Auftrag der

**Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53  
51427 Bergisch Gladbach**

Autoren: DI Johannes Hiesmayr  
Dr. Martin Dippold  
DI Werner Stadlhofer  
DI Christian Zinner  
Ao. Univ.-Prof. Dr. Stefan Hausberger

Dieser Bericht darf nur vollinhaltlich, ohne Weglassen und  
Hinzufügen, veröffentlicht werden.  
Sollte er auszugsweise abgedruckt oder vervielfältigt werden,  
so ist vorher die schriftliche Genehmigung der Verfasser einzuholen.

**Endbericht zum Projekt:  
FE 84.0521/2015  
Entwicklung eines Modells zur Generierung von Emissionsfaktoren für motorisierte  
Zweiräder aus Abgasmessungen**

## Inhalt

|           |                                                                              |           |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Kurzfassung .....</b>                                                     | <b>5</b>  |
| <b>2.</b> | <b>Abstract .....</b>                                                        | <b>7</b>  |
| <b>3.</b> | <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                           | <b>9</b>  |
| <b>4.</b> | <b>Einleitung .....</b>                                                      | <b>10</b> |
| <b>5.</b> | <b>Fahrzeugbeschaffung .....</b>                                             | <b>10</b> |
| <b>6.</b> | <b>Messaufbau .....</b>                                                      | <b>12</b> |
| 6.1.      | Verwendete Messgeräte im realen Fahrbetrieb .....                            | 12        |
| 6.2.      | Verwendete Messgeräte bei Messungen am Rollenprüfstand .....                 | 15        |
| <b>7.</b> | <b>Testverfahren .....</b>                                                   | <b>17</b> |
| 7.1.      | Messungen im Realbetrieb .....                                               | 18        |
| 7.1.1.    | Kinematische Bewertungskennzahlen .....                                      | 20        |
| 7.1.2.    | Auswahl der Straßensegmente für die Tests .....                              | 22        |
| 7.1.3.    | Auswertung der Testsegmente in Bezug auf die Fahrdynamik .....               | 24        |
| 7.1.4.    | Ausarbeitung von Real World Testzyklen für die Zweiradrolle .....            | 27        |
| 7.2.      | Messungen auf der Zweiradrolle .....                                         | 32        |
| <b>8.</b> | <b>Messergebnisse .....</b>                                                  | <b>33</b> |
| 8.1.      | Einflussfaktoren der Messtechnik auf die Messergebnisse im Realbetrieb ..... | 33        |
| 8.1.1.    | Einflüsse des Messaufbaus auf Motor- und Emissionsparameter .....            | 34        |
| 8.1.2.    | Einfluss des EFM .....                                                       | 36        |
| 8.2.      | Ergebnisse der Fahrdynamikuntersuchungen .....                               | 39        |
| 8.3.      | Ergebnisse der limitierten Emissionskomponenten .....                        | 42        |
| 8.4.      | Nicht limitierte gesundheits- und klimarelevante Emissionskomponenten .....  | 46        |
| <b>9.</b> | <b>Simulation und Softwareerstellung .....</b>                               | <b>52</b> |
| 9.1.      | Das Simulationsmodell PHEM .....                                             | 52        |
| 9.1.1.    | Einsatzgebiete .....                                                         | 53        |
| 9.1.2.    | Kurzbeschreibung .....                                                       | 53        |
| 9.1.3.    | CO <sub>2</sub> Leistungsinterpolation .....                                 | 54        |
| 9.2.      | Modellerstellung .....                                                       | 56        |
| 9.2.1.    | Verfügbare Messungen und Erstellung der Motorkennfelder .....                | 56        |
| 9.2.2.    | Erstellung der Emissionskennfelder und Simulation der Rollentests .....      | 58        |
| 9.2.4.    | Erstellung der Emissionskennfelder aus On-Board Messungen .....              | 71        |
| 9.3.      | Bestimmung der Fahrwiderstände aus Realfahrten .....                         | 73        |
| 9.4.      | PHEM Schaltmodell .....                                                      | 75        |
| 9.4.1.    | Beurteilung der Qualität des PHEM-PKW-Schaltmodells für 2-Räder .....        | 76        |

|            |                                                                                                 |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>10.</b> | <b>Ausarbeitung der Grundlagen für zukünftige Messkampagnen.....</b>                            | <b>76</b> |
| 10.1.      | Auswahl der Fahrzeuge.....                                                                      | 77        |
| 10.2.      | Optimale Anteile PEMS und Rollentests in einer Messkampagne.....                                | 78        |
| 10.3.      | Testzyklen und Messgrößen am Rollenprüfstand .....                                              | 81        |
| 10.3.1.    | Real Drive Test Cycles und on-road Referenzmessungen.....                                       | 83        |
| 10.4.      | Randbedingungen und Messgrößen für on-road Tests.....                                           | 84        |
| 10.4.1.    | Aufbau eines PEMS auf Zweirädern .....                                                          | 85        |
| 10.4.2.    | Messgrößen für on-road Messungen mit PEMS .....                                                 | 86        |
| 10.5.      | Datenauswertung zur Berechnung der Emissionsfaktoren .....                                      | 87        |
| <b>11.</b> | <b>Untersuchung bezüglich eines mobil einsetzbaren Abgas-Messsystems für<br/>Zweiräder.....</b> | <b>87</b> |
| 11.1.      | Sensorbasiertes System.....                                                                     | 88        |
| 11.2.      | Analysatorbasiertes System .....                                                                | 90        |
| 11.2.1.    | Abgasmassenstrommessung.....                                                                    | 91        |
| 11.3.      | Zusammenfassung .....                                                                           | 92        |
| <b>12.</b> | <b>Literatur .....</b>                                                                          | <b>95</b> |
| <b>13.</b> | <b>Tabellenverzeichnis.....</b>                                                                 | <b>96</b> |
| <b>14.</b> | <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>                                                               | <b>97</b> |



## 1. Kurzfassung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein Verfahren entwickelt und validiert, mit dem sich reale Emissionsfaktoren für motorisierte Zweiräder in der Systematik des HBEFA generieren lassen.

Das Verfahren basiert auf Fahrzeug-Emissionsmessungen in realen Testzyklen, vermessen am Rollenprüfstand oder auf der Straße, als Eingabe für ein Simulationsmodell. Das Modell erzeugt aus den Messungen Motorkennfelder, in denen die Abgasemissionen und der Kraftstoffverbrauch über normierter Motordrehzahl und normierter Motorleistung abgelegt werden. Für jedes gemessene Kfz ergibt sich ein normiertes Emissions-Motorkennfeld. Aus den einzelnen Kennfeldern können dann Durchschnittskennfelder je Fahrzeugkategorie (z.B. Motorrad über 500ccm, EURO 3) gebildet werden. Die Motordrehzahl muss in den Emissionstests entweder gemessen, oder aus Geschwindigkeit, Gang, Reifenumfang und Übersetzungen berechnet werden. Die Motorleistung kann mittels gemessenem CO<sub>2</sub>-Massenstrom und der Drehzahl aus „generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeldern“ ermittelt werden, da im Allgemeinen keine gemessene Leistung vorliegt.

Um mit dem Modell dann Emissionsfaktoren für beliebige Fahrzyklen zu bestimmen, wird die Motorleistung aus der Fahrzeuglängsdynamik, den Verlusten im Antriebstrang und dem Leistungsbedarf von Nebenaggregaten aus dem jeweils vorgegebenen Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf berechnet. Zur Bestimmung der Drehzahl wird zuerst ein passender Gang berechnet und dann aus den Übersetzungen die Motordrehzahl. Steht die geforderte Motorleistung in keinem Gang zur Verfügung, wird die Beschleunigung im betroffenen Zeitschritt so reduziert, dass sich ein Vollastbetrieb ergibt. Die Berechnungen erfolgen in 1Hz Auflösung. Für jede Sekunde werden dann aus dem zugehörigen Motorkennfeld die Emissionen entsprechend der Drehzahl und Leistung interpoliert. Die integrierten Emissionswerte über den Zyklus ergeben die Summenemissionen, die Division durch die zurückgelegte Strecke die Emissionsfaktoren in g/km. Die Methode wurde im Simulationsprogramm PHEM implementiert. Da PHEM bereits in einem ähnlichen Verfahren Emissionsfaktoren für PKW, LNF und SNF berechnet, war der Zusatzaufwand zum Einbau von Zweirädern nieder und alle Zusatzfunktionen von PHEM können auch für Zweiräder verwendet werden (z.B. Dynamikkorrekturen, automatisierte CO<sub>2</sub>-basierte Kennfelderzeugung, Batch-Modus, etc.).

In dem Projekt wurde die Modellentwicklung und Validierung anhand von 4 gemessenen Zweirädern durchgeführt. Die Tests umfassten Abgasmessungen auf einem Rollenprüfstand sowie On-Road-Messungen mittels PEMS. Die Messkampagne wurde auch genutzt, um einen Vorschlag für ein einheitliches Minimalmessprogramm zur Bestimmung von Emissionsfaktoren von Zweirädern zu erarbeiten. Dazu wurden umfangreiche Fahrversuche im realen Betrieb durchgeführt, die gemessenen Zyklen in Teilstücke verschiedener Verkehrssituationen unterteilt und je Verkehrssituation ein repräsentatives Teilstück bestimmt. Diese wurden dann zu „Real World Rollenzyklen“ zusammengefügt. Bei einem Motorradzyklus ist auch ein sportlicher Fahranteil mit Steigung enthalten. Damit ist sichergestellt, dass die Motorkennfelder mit diesen Rollentests gut abgedeckt sind und bei der Berechnung von Emissionsfaktoren keine Extrapolationen von Emissionswerten erforderlich sind. Die am Markt befindlichen PEMS Systeme sind für die Verwendung bei Zweirädern wegen deren Gewicht und Baugröße nicht für alle Fahrzeuge geeignet. PEMS Messungen sind vorerst nur bei größeren Motorrädern im realen Verkehr möglich.

Die Emissionskennfelder enthalten jeweils CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC sowie optional auch die vom FTIR gemessenen Komponenten und Partikelanzahl. Die nicht limitierten Abgaskomponenten aus der FTIR Messung können, wegen der teilweise sehr niederen Emissionsniveaus,

nur unsicher zeitaufgelöst gemessen und simuliert werden, so dass hier die Verwendung von Zyklusmittelwerten in [g/km] oder von mittleren Prozentwerten an den HC und NO<sub>x</sub> Emissionen empfohlen wird.

Mit der entwickelten Methode und der Software PHEM bestehen nunmehr die Grundlagen, Emissionsfaktoren für Zweiräder in gleicher Qualität wie sie bei PKW und Nutzfahrzeugen bereits Standard ist, zu gerieren. Die Methoden und mögliche gemeinsame Messprogramme werden in derERMES Gruppe bereits diskutiert und werden hoffentlich schon 2018 zu einer deutlichen Verbreiterung der Datengrundlage zum Emissionsverhalten von Zweirädern führen.

## 2. Abstract

In the actual research project a method for the assessment of real drive emission factors from powered two-wheelers as input for the HBEFA was developed and validated.

The method is based on vehicle emission tests in real driving conditions as input for a simulation model. The model generates engine emission maps from the test data, which store the exhaust gas emissions and the fuel flow as function of the normalised engine speed and power values. Each measured vehicle results in one emission map. From the single emission maps average maps per vehicle class can be computed (e.g. for motorcycles >500ccm, EURO 3). In the emission tests, the engine speed either has to be measured or can be computed from the measured vehicle speed, the tire dimension and the transmission ratios if the actual gear is recorded. The engine power can be calculated from the measured CO<sub>2</sub>-massflow and the engine speed based on “generic CO<sub>2</sub> maps” since typically no measured power signal is available from emission tests.

To calculate emission factors from the average engine maps for any driving cycle, the engine power is calculated from vehicle longitudinal equations. The approach covers air drag, rolling resistance, road gradients, losses in the transmission and power demand from auxiliaries. The engine speed is simulated from a gear shift model with the transmission ratios and the tire dimension. If the demanded engine power is not available at any gear, the acceleration is reduced in the time steps concerned to run the engine in full load operation. The simulation runs in 1 Hz and for each second the model interpolates the emissions from the engine map. Integrating the emissions over the cycle gives the total emission value. The division by the cycle distance gives the emission factor in g/km.

The method is implemented in the emission model PHEM. Since PHEM already is used to simulate emission factors for cars, LCVs and HDVs the extra effort was rather low and all functionalities from PHEM can now be used for two-wheeler simulation too (e.g. transient corrections, automated engine map creation, batch modus, etc.).

In the project the model development and validation is based on emission tests on four two-wheelers. The tests covered chassis dyno measurements in the type approval cycle and in real world cycles as well as on-board measurements with PEMS. The measurement campaign was used also to develop a minimum measurement protocol for the elaboration of emission factors. First, extensive real drive tests were performed, then the measured cycles were separated into sub-cycles representing single traffic situations. For each traffic situation one representative sub-cycle was selected from all data to form the total real world test cycle. For the motorcycles, also a sport-orientated sub-cycle with road gradient was included to ensure a good coverage of the resulting engine emission map for all relevant real world situations. A good coverage of the engine map is relevant to avoid extrapolations later on in the emission factor simulation.

Actually available PEMS proved not to be fully applicable for testing two-wheelers due to the weight and the size of the measurement system. Thus, PEMS tests are recommended so far only for larger motorcycles.

The emission maps cover CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC and optional non regulated exhaust gases measured with FTIR and the particle number. The non-regulated exhaust gas components partly have a quite low concentration and thus have higher uncertainties in the modal test data and in the simulation. For these components, either average cycle values in [g/km] or average shares on the emissions of HC and NO<sub>x</sub> emissions are recommended for emission factors.

The method developed provides the basis to simulate emission factors for two-wheelers in a similar quality as it is already standard for cars and for HDVs. The methods and test protocols elaborated, are already discussed in the ERMES group and may lead already in 2018 to a remarkable broader database on the emission behaviour of two-wheelers.

### 3. Abkürzungsverzeichnis

|              |                                                                                                              |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CADC         | Common ARTEMIS Driving Cycle (Urban, Rural, MW = Motorway)                                                   |
| CF           | Conformity factor                                                                                            |
| CLD          | Chemiluminescens Detektor                                                                                    |
| DF           | Deterioration Factor (auf Messwert in Typprüfung aufzuschlagen um Alterung abzubilden, falls nicht gemessen) |
| ERMES        | European Research group on Mobile Emission Sources                                                           |
| EU           | European Union                                                                                               |
| FC           | Fuel consumption                                                                                             |
| FID          | Flammenionisationsdetektor                                                                                   |
| FTIR         | Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie zur Messung nicht limitierter Emssionskomponenten             |
| HBEFA        | Handbook Emission Factors for Road Transport                                                                 |
| IRD          | Infrarot Detektor                                                                                            |
| $P_e$        | Effektive Leistung                                                                                           |
| $P_{e,norm}$ | normierte effektive Leistung (0kW = 0; Nennleistung = 1,0)                                                   |
| $P_{rated}$  | Nennleistung                                                                                                 |
| PMD          | Paramagnetischer Detektor                                                                                    |
| QCL          | Quantum Kaskaden Laser Detektor                                                                              |
| RDC          | Real Drive Cycle                                                                                             |
| RDE          | Real Drive Emissions                                                                                         |
| RDM          | Real Drive Cycle Mofa                                                                                        |
| RWC          | Real world cycle                                                                                             |
| PEMS         | Portable Emission Measurement System                                                                         |
| PHEM         | Passenger car and Heavy duty Emision Model                                                                   |
| TUG          | Graz University of Technology                                                                                |
| WLTC         | Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycle                                                          |

## 4. Einleitung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein Modell entwickelt, mit dem sich kennfeldbasiert Emissionsfaktoren für motorisierte Zweiräder, sowohl für Krafträder als auch für Kleinkrafträder (EG-Fahrzeugklassen L1e und L3e), in der Systematik des HBEFA generieren lassen. Das Modell ist in der Lage das Emissionsverhalten dieser Fahrzeugklassen für die im realen Straßenverkehr durchfahrenen Kennfeldbereiche abzubilden, um damit Emissions- und Verbrauchswerte für die im HBEFA klassifizierten Verkehrssituationen simulieren zu können. Als Ergebnis wurden Emissions- und Verbrauchsfaktoren für limitierte Schadstoffe und etwaige nicht limitierte Abgaskomponenten berechnet.

Als Datengrundlage wurden Fahrzeugmessdaten aus Abgasmessungen auf einem Rollenprüfstand sowie aus On-Road-Messungen mittels eines PEMS ermittelt, welche in das Modell einfließen. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Abgasmessdaten Kennfeldbereiche abdecken, die im realen Fahrbetrieb dieser Fahrzeugklassen relevant sind, von den jeweiligen Typprüfzyklen aber nicht erfasst sind.

Der nachfolgende Schlussbericht zum Projekt „Entwicklung eines Modells zur Generierung von Emissionsfaktoren für motorisierte Zweiräder aus Abgasmessungen“ beinhaltet die detaillierte Beschreibung der Fahrzeugauswahl, die vollständige Auflistung der durchgeführten Messungen und Versuche mit den Fahrzeugen, die Ergebnisse der Messungen sowie eine Beschreibung der Simulation der Emissionen und Erstellung der Emissionsfaktoren mit Diskussion der Ergebnisse dieser Simulationen. Des Weiteren werden die Grundlagen einer Methodik erarbeitet, die insbesondere folgende Fragestellungen beantworten sollen (wie schon im Zwischenbericht zusammengefasst):

- Wie können in Zukunft Real World Emissionen von motorisierten Zweirädern am effektivsten gemessen werden?
- Wie können diese Messdaten als Grundlage für die Simulation von Emissionsfaktoren für Updates im HBEFA im Modell PHEM eingesetzt werden?
- Wie können Messungen nicht-limitierter Abgaskomponenten in die Methode integriert werden?

Die Simulation basiert auf dem Modell PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model), wodurch es möglich ist für das HBEFA eine gemeinsame Plattform mit PKW, LNF und SNF nutzen zu können. Die Emissionsfaktoren für PKW, LNF und SNF werden bereits alle mit PHEM berechnet.

Im vorliegenden Projekt wird das Modell PHEM verwendet, um für die vier gemessenen Zweiräder Eingabedatensätze zu erstellen und die Modellgenauigkeit durch einen Vergleich mit den Messdaten zu überprüfen. Die dabei festgestellten Anpassungserfordernisse des Modells werden geprüft und umgesetzt, um eine funktionsfähige und validierte Methode zur effizienten Ermittlung von Emissionsfaktoren für motorisierte 2-Räder bereit zu stellen.


## 5. Fahrzeugbeschaffung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden je zwei motorisierte Zweiräder der Fahrzeugklassen L1e und L3e vermessen. Zusätzlich wurde ein weiteres Fahrzeug der Klasse L1 (BMW G650 GS) zur erweiterten Ermittlung der Dynamikparameter herangezogen um insgesamt eine bessere Abdeckung der im Betrieb befindlichen Motorräder zu erhalten. Die Auswahl der Fahrzeuge erfolgte nach folgenden Grundsätzen (AP1a: Beschaffung der Fahrzeuge):

- Repräsentative Leistungsklasse innerhalb der Fahrzeugklasse basierend auf Zahlen der Zulassungsstatistik 09/2015 (KBA-Statistik)
- Eher hohe Motorleistungen da dort eine kleine Abdeckung des motorischen Kennfeldbereiches durch Rollenprüfstandmessungen gegeben ist (eine geringe Überschneidung der Straßenbetriebspunkte mit den möglichen Betriebspunkten im Rollenzyklus stellt die größte Herausforderung für die Extrapolation und Gewinnung von Emissionsfaktoren dar).

Die Fahrzeuge wurden mit einer Kilometerleistung zwischen 2000 und 10.000km als Gebrauchtfahrzeuge angeschafft. Nachfolgende Tabelle listet alle verwendeten Fahrzeuge auf.

**Tabelle 1: Versuchsfahrzeuge zur Untersuchung von Fahrdynamik und Emissionen**

| <b>#1: BMW F 800 GT</b>                                                            |                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Motorprinzip                                                                       | EU3 - wassergekühlter Zweizylinder-Viertaktmotor |
| Kubatur                                                                            | 798 cm <sup>3</sup>                              |
| Nominelle Leistung                                                                 | 66 kW at 8000 U/min                              |
| Maximales Drehmoment                                                               | 86 Nm at 5800 U/min                              |
| Leergewicht <sup>(a)</sup>                                                         | 213 kg                                           |
|  |                                                  |
| <b>#2: BMW G 650 GS</b>                                                            |                                                  |
| Motorprinzip                                                                       | EU3 - wassergekühlter Einzylinder-Viertaktmotor  |
| Kubatur                                                                            | 652 cm <sup>3</sup>                              |
| Nominelle Leistung                                                                 | 35 kW bei 6500 U/min                             |
| Maximales Drehmoment                                                               | 60 Nm bei 5000 U/min                             |
| Leergewicht <sup>(a)</sup>                                                         | 192 kg                                           |
| <b>#3: KTM 125 Duke</b>                                                            |                                                  |
| Motorprinzip                                                                       | EU3 - wassergekühlter Einzylinder-Viertaktmotor  |
| Kubatur                                                                            | 124,7 cm <sup>3</sup>                            |
| Nominelle Leistung                                                                 | 11 kW bei 9500 U/min                             |
| Maximales Drehmoment                                                               | 11,8 Nm bei 8000 U/min                           |
| Leergewicht <sup>(b)</sup>                                                         | 127 kg                                           |
| <b>#4: Honda Zoomer</b>                                                            |                                                  |
| Motorprinzip                                                                       | EU3 - wassergekühlter Einzylinder-Viertaktmotor  |
| Kubatur                                                                            | 49 cm <sup>3</sup>                               |
| Nominelle Leistung                                                                 | 3,5 kW bei 7500 U/min                            |
| Maximales Drehmoment                                                               | 4,5 Nm bei 5000 U/min                            |
| Leergewicht <sup>(a)</sup>                                                         | 89 kg                                            |

---

### #5: Peugeot Speedfight 3

---

|                            |                                                     |
|----------------------------|-----------------------------------------------------|
| Motorprinzip               | EU3 - wassergekühlter<br>Einzyylinder-Zweitaktmotor |
| Kubatur                    | 49 cm <sup>3</sup>                                  |
| Nominelle Leistung         | 3,6 kW bei 7300 U/min                               |
| Maximales Drehmoment       | 4,2 Nm bei 6800 U/min                               |
| Leergewicht <sup>(a)</sup> | 97 kg                                               |

---

(a) Fahrbereit und mit vollem Tank

(b) Gewicht ohne Tankfüllung

Das Bild der BMW F800GT wurde am Institut aufgenommen.

## 6. Messaufbau

Der vollständige Messaufbau gliedert sich thematisch in zwei Bereiche (AP1b: Aufbau und Verifikation der Messtechnik). So wurde *zum einen* auf dem Motorrad BMW F800 GT ein vollständiges PEMS installiert. Auf Grund der ausladenden Abmaße des Fahrzeuges durch die Anbringung sämtlicher Messgeräte – insbesondere die Anbringung des EFM stellt sich als technisch kompliziert heraus – beschränkte sich der Aufbau des vollständigen PEMS aus sicherheitstechnischen Gründen auf ein Motorrad. *Zum anderen* wurde bei Messungen am Prüfstand neben dem PEMS ein zusätzliches Messsystem mit FTIR installiert. Folglich wurde am Prüfstand stets parallel mit zwei Emissions-Analysen sowie der am Prüfstand befindlichen stationären CVS Anlage als dritten Analysator gemessen. Bei Fahrzeugen ohne möglichen PEMS Aufbau wurde dennoch das gesamte System am Prüfstandsboden neben dem Kraftfahrzeug installiert um vollständige Messreihen zu erhalten. Die folgenden Unterpunkte 3.1 und 3.2 beschreiben hierzu separat die Messaufbauten mit den verwendeten Messgeräten wie oben beschrieben. Zusätzlich zu den verwendeten externen Messgeräten wurden Motor- und Fahrzeugparameter aufgezeichnet. Ein Zugang zum internen Fahrzeug-CAN war nur bei dem BMW F800 GT Motorrad möglich. Bei allen anderen Fahrzeugen wurden diverse Parameter, wie beispielsweise die Drehzahl mittels anderer Messmethoden, wie einem Hallsensor oder durch Abgriff des Zündkerzensignals ermittelt. Eine Liste aller zur Auswertung der Test notwendigen Parameter sowie dessen jeweiliges Messprinzip/Sensorprinzip wird in Kapitel 5 explizit angegeben.

### 6.1. Verwendete Messgeräte im realen Fahrbetrieb

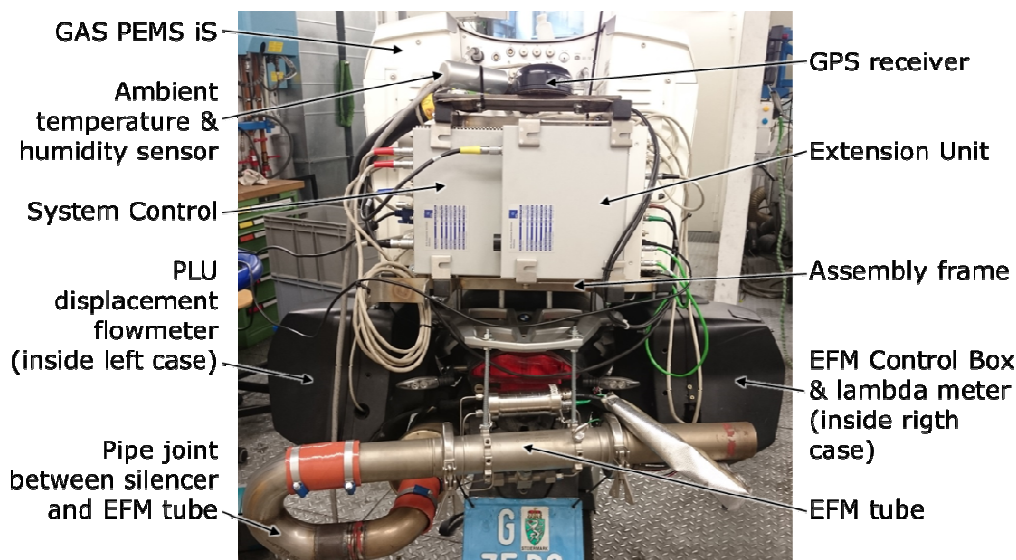
Folgende Darstellungen veranschaulichen den vollständigen Aufbau des PEMS auf dem Motorrad BMW F800 GT. Die verwendeten Messgeräte sind im Folgenden tabellarisch aufgelistet:

- AVL M.O.V.E. GAS PEMS iS: Dieses ist ein portables Messsystem zur Analyse von NO, NO<sub>2</sub>, CO und CO<sub>2</sub> Emissionen. Dieses Gerät beinhaltet zusätzlich Akkumulatoren zur Stromversorgung der gesamten an Bord befindlichen Messtechnik welche für eine Messzeit von etwa vier Stunden ausreichen.
- AVL M.O.V.E. EFM: Dies ist ein Exhaust Flow Meter dessen Messprinzip auf Differenzdruckmessungen beruht und auf Grund dessen sehr sensitiv auf die Einbaulage



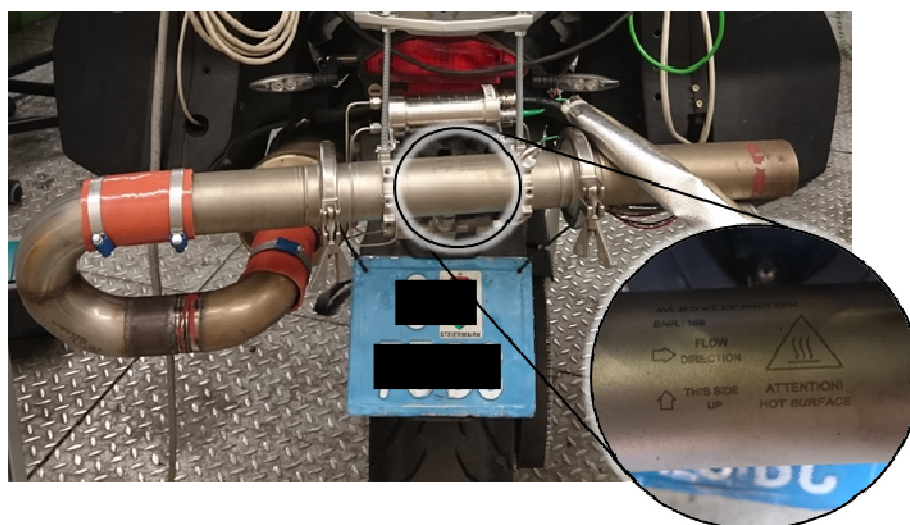
in Verbindung mit etwaig anfallendem Kondensat reagiert. Die horizontale Einbaulage stellte sich unter diesem Gesichtspunkt als optimal heraus, was im Hinblick auf die Verkehrssicherheit berücksichtigt werden muss. Wie weiter unten dargestellt, wurde bei allen Prüfstandmessungen der EFM ebenfalls horizontal, jedoch nicht am Motorrad befindlich, sondern mit laut Norm ausreichend langer Beruhigungsstrecke hinter dem Fahrzeug mit Hilfe eines Kranes angebracht. Bei Realfahrten ist dies nicht möglich was eine gewisse Unschärfe in den Messungen des Massenstroms im realen Verkehr mit sich bringt.

- AVL PLU116H Flow Meter: Dies ist ein Volumenstrommessgerät, nach dem Verdrängungsprinzip arbeitend, welches zur Messung und Berechnung des Kraftstoffverbrauchs herangezogen wurde.
- AVL PLUtron: Dies ist ein Volumenstrommessgerät der neusten Generation welches noch nicht im realen Fahrbetrieb aber bei den Prüfstandsmessungen verwendet wurde um zeitlich hoch aufgelöste und genaue Daten zum Kraftstoffverbrauch zu erhalten. Die Messgenauigkeit dieses Gerätes ist derart hochauflösend, dass die Rückwirkungen der Einspritzvorgänge auf den Druckverlauf in der Kraftstoffleitung abgebildet werden können. In späterer Folge könnten sich auf Basis solch genauer Messungen im realen Fahrbetrieb in Kombination mit einem sehr genauen Lambdameter Möglichkeiten zum Ersetzen des EFM ergeben.
- Die Gepäcksboxen links und rechts am Motorrad werden verwendet um ein Lambdameter für die verwendete Breitband Lambdasonde, die Steuereinheit für den EFM sowie eine zusätzliche Batterie für die Messtechnik unterzubringen.
- Zum Aufzeichnen der Umgebungsbedingungen und einer zusätzlichen Fahrzeuggeschwindigkeit ist ein GPS Receiver mit Zusatzfunktionen am Heck des Motorrades angebracht.
- Die gesamte Datenerfassung des PEMS wird von einer sogenannten System Control – einem auf Windows 7 basierten Computer – gehandhabt, welche über eine separate Batterie mit Spannung versorgt wird. Damit ist das PEMS autark und für den realen Fahrbetrieb einsetzbar.



**Abbildung 1: Messaufbau eines vollständigen PEMS auf einem BMW F800 GT Motorrad.**

Mit der vollständigen Messtechnik des hier verwendeten PEMS ergibt sich dadurch ein ausladender und vor allem mit 80kg für ein Motorrad durchaus schwerer Messaufbau welcher im Hinblick auf die Verkehrssicherheit nicht auf kleinere Motorräder als das verwendete BMW F800 GT Motorrad adaptierbar ist.



**Abbildung 2: Detailansicht des EFM als Teil eines PEMS an einem BMW F800 GT Motorrad.**

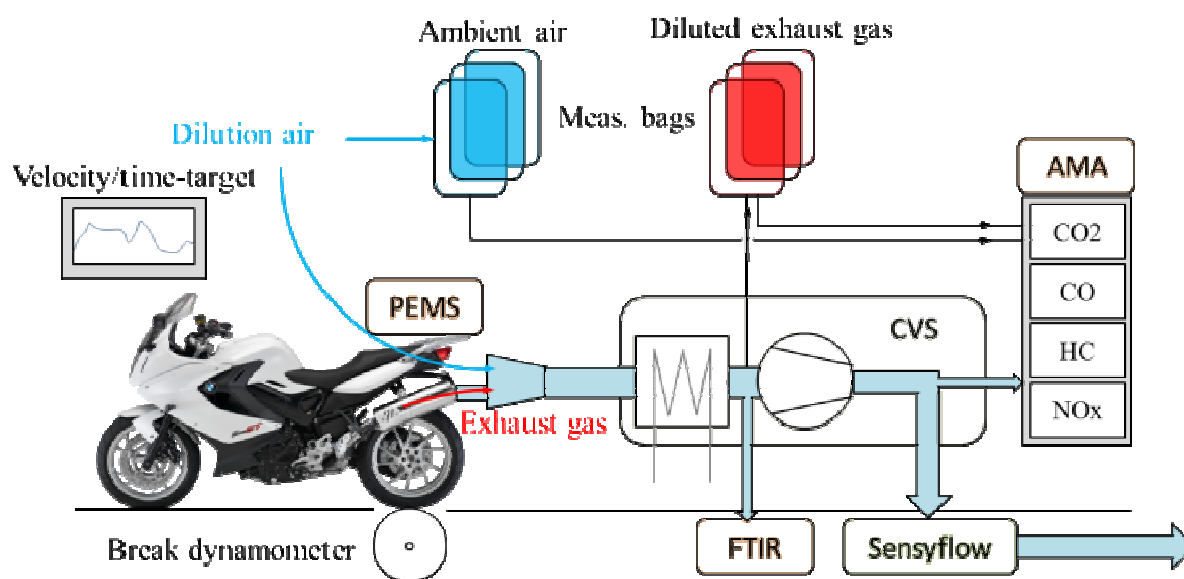
Wie zusätzlich in Abbildung 2 dargestellt, ist die Einbaulage des EFM zu beachten. Auf Grund des Messprinzips mittels Differenzdruckmessung ist das Gerät darauf empfindlich, wobei an dieser Stelle noch einmal explizit auf die laut Norm vorgeschriebene Beruhigungsstrecke vor der Messstrecke hingewiesen wird. Im realen Fahrbetrieb ist dies auf Grund der Abmessungen des Messgerätes nicht möglich gewesen, jedoch wurden Referenzmessungen mit normgerechter Beruhigungsstrecke bei verschiedenen Testzyklen am Rollenprüfstand durchgeführt, die bei den durchgeführten Fahrten keine signifikanten Fehler der Massenstrommessungen aufzeigten. Darauf wird in den Kapiteln 6.2 und 8 noch näher eingegangen.

Die Entnahmeposition der Abgase im realen Fahrbetrieb wurde am Fahrzeugkrümmer nach dem Katalysator und vor dem Endschalldämpfer gewählt. Diese Position erwies sich als am stabilsten gegenüber vom Motor indizierten Druckschwankungen. Bei Positionierung der

Entnahme nach EFM wurde durch Druckpulse teilweise Frischluft in das Messsystem gesaugt. Im Gegensatz dazu wurde anfänglich auch eine Position nach dem EFM Rohr untersucht, welche sich aus oben genanntem Grund nicht eignete. Dazu ist zu beachten, dass durch diese Anordnung der Abgasmassenstrom bei der Auswertung stromabwärts liegender Messstellen (also in dem Fall der CVS-Anlage) entsprechend um die jeweilige Entnahmemenge korrigiert werden muss.

## 6.2. Verwendete Messgeräte bei Messungen am Rollenprüfstand

Wie oben beschrieben fanden bei den Tests am Rollenprüfstand zusätzlich zu dem vollen Messaufbau des PEMS weitere Messgeräte Verwendung. Abbildung 3 und Abbildung 4 veranschaulichen den vollständigen Aufbau am Beispiel des Motorrades BMW F800 GT. In Abbildung 3 sieht man das PEMS im Vordergrund, die gerade Beruhigungsstrecke für die Abgase inklusive EFM hinter dem Fahrzeug sowie die Monitore für PLUtron und FTIR auf der rechten Seite. Der gräuliche Kasten im Hintergrund in Bildmitte ist die CVS Anlage, welche mit einer AVL AMA Abgas-Analyse verbunden ist. Das FTIR selbst und die Beutel für die Beutelmessungen zur Bestimmung der legislativen Emissionsgrenzwerte sind im Bild nicht sichtbar. Zur zusätzlichen Evaluierung des verdünnten Abgasmassenstroms wurde ein ABB Sensyflow-Volumenstrommessgerät in das Messsystem eingebunden, welches nach dem Hitzdraht-Messprinzip funktioniert.



**Abbildung 3: Schematische Darstellung des vollständigen Messaufbaus am Rollenprüfstand.**

Die Anordnung der Messgeräte am Rollenprüfstand wurde derart gewählt, dass ein Wechsel des Fahrzeuges leicht möglich war. Somit konnte der Messaufbau, bis auf geringe Umbauten und bis auf den Wechsel der Anschlüsse für die Sensoren am Fahrzeug selbst, vom Grundprinzip für alle vermessenen Fahrzeuge gleich verwendet werden.



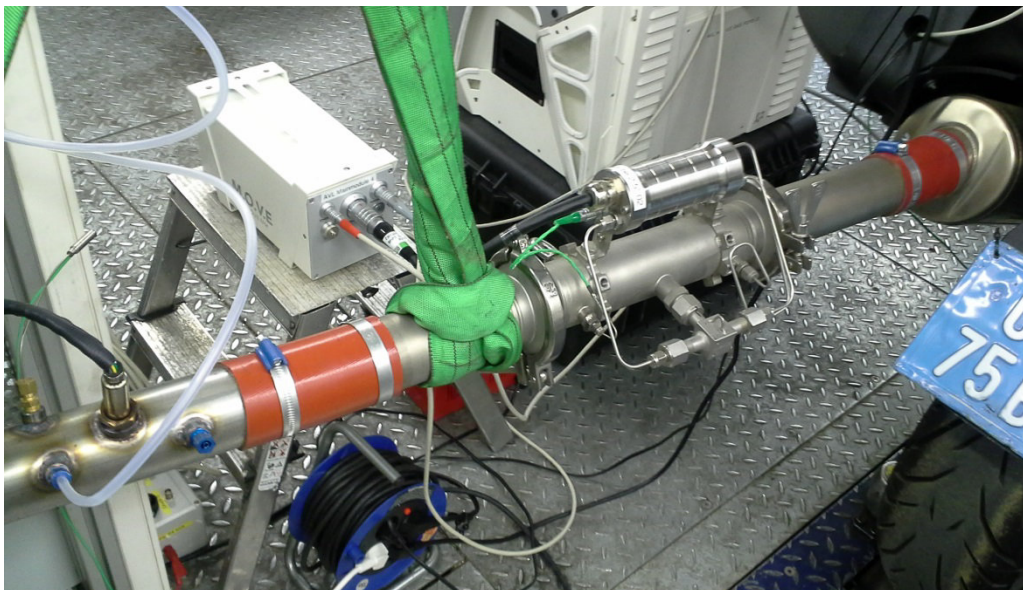
**Abbildung 4: Messaufbau am Rollenprüfstand mit PEMS, FTIR, PLUtron und CVS Anlage inklusive Abgas-Analysator.**

Folgende Abbildung 5 zeigt die Anordnung der Beruhigungsstrecke des Abgases mit EFM und Anschlüssen für die Sensoren. Es ist zu erkennen, dass die Entnahmeposition für das Abgas nach dem Endschalldämpfer hinter dem EFM angeordnet ist. Dadurch muss der Massenstrom des Abgases lediglich um die Entnahmemenge der Messung vor dem Katalysator korrigiert werden – falls eine solche angeschlossen war. Bei letzterer Messkampagne (siehe dazu die Übersicht aller Messungen in Tabelle 12) wurde mit PEMS und FTIR nach dem Katalysator gemessen, da hier nicht nur die gasförmigen limitierten Emissionen (mit PEMS ermittelbar bis auf HC Emissionen) sondern auch nicht limitierte Emissionskomponenten, wie beispielsweise Benzol, interessiert.

Zusätzlich sind Anschlüsse für eine Lambdasonde, Abgasdruckmessungen und mehrere Thermoelemente angebracht worden um Erkenntnisse über den Beruhigungszustand des Abgasstromes nach dem EFM und weitere Informationen aufzeichnen zu können.

Die CVS Anlage inklusive AVL AMA Abgas Analyse wurde als offenen CVS Anlage eingebunden. Mit diesem dritten Messsystem wurde ein Abgleich der anderen beiden Systeme geschaffen und vor allem die Messung der Summen HC Emissionen wurde von dieser Analyse übernommen. Diese Anlage auf der Zweiradrolle wird für Homologationen von motorisierten Zweirädern verwendet und diese wurde daher auch verwendet um die summierten Grenzwerte pro Kilometer der unterschiedlichen Fahrzeuge bei den einzelnen Testzyklen zu bestimmen (siehe dazu Kapitel 8.3).





**Abbildung 5: Einbindung des EFM am Rollenprüfstand mit normgerechter Beruhigungsstrecke und Abgasentnahmestellen und weiteren Messanschlüssen.**

Nachstehende Liste fasst die zusätzlich am Rollenprüfstand verwendeten Messgeräte zusammen, wobei nachstehend eine kurze Beschreibung des Messprinzips angeführt wird:

- FTIR: Dieser Fourier Transformation Spektroskopie Analysator wurde zur zusätzlichen Messung der Konzentrationen von nicht limitierten Emissionskomponenten sowie zur Evaluierung der anderen Messergebnisse verwendet. Das Messprinzip dieses Systems basiert auf der Absorptionsrate von infraroten Lichtimpulsen auf Grund der Durchströmung durch das Messgas im Vergleich zu normierten Gasküvetten oder bekannten Spektrallinien.
- AVL AMA i60: Dieser Abgas-Analysator wurde in Verbindung mit einem vorgeschalteten CVS zur zusätzlichen Bestimmung der legislativ limitierten Emissionskomponenten verwendet. Dieses System verwendet verschiedene Analysator-Messprinzipien (FID, CLD, IRD, PMD, QCL) für die Abgaskomponenten THC, NO/NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>.
- ABB Sensyflow: Dieses Volumenstrom-Messgerät wurde zusätzlich in den Ansaugkanal des CVS für das verdünnte Abgas eingebunden um die Absaugraten und Verdünnungsraten abgleichen zu können.

## 7. Testverfahren

Die folgende Tabelle 2 stellt die Zusammenfassung der gesamten Messungen samt Zweck derselben dar, die im Projekt durchgeführt wurden. Es wurden für die einzelnen Fahrzeugklassen Randbedingungen für Real World Tests über die Bestimmung von realen Dynamikparametern definiert. Dabei wurden Anteile verschiedener Verkehrssituationen entsprechen HBEFA vermessen, wie in Kapitel 7.1.2 näher erläutert. Daraus wurden sinnvolle Randbedingungen für RDE Tests ermittelt, welche sicherstellen sollen, dass in zukünftigen Messprogrammen vergleichbare Daten erzeugt werden können, die die realen Betriebspunkte der Fahrzeuge abdecken (AP2: Ausarbeitung der Testverfahren).

Tabelle 2: Übersicht aller Messungen, durchgeführt im Rahmen des BAST Projektes.

| # Messkampagne | Rolle / Real | Zweck (Stichwort)                                    | Summe Einzelmessungen/-fahrten | verwendete Testzyklen                                                                                                      | verwendete Fahrzeuge |
|----------------|--------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| MK1            | Real         | Fahrdynamik (Dynamikparameter)                       | 394                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• gesamte Messmatrix (s. Tabelle 3)</li> <li>• Arzberg</li> <li>• Ries</li> </ul>   | alle                 |
| MK2            | Rolle        | Evaluierung der Real World Cycles (Dynamikparameter) | 24                             | siehe Kapitel 7.1.4 <ul style="list-style-type: none"> <li>• RDC1</li> <li>• RDC2</li> <li>• RDC3</li> </ul>               | BMW F800 GT          |
| MK3            | Real         | RDE                                                  | 42                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Arzberg</li> <li>• Ries</li> <li>• Gaberl</li> </ul>                              | BMW F800 GT          |
| MK4            | Rolle        | Emissionen                                           | 22                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• RDC1</li> <li>• RDC2</li> <li>• RDM</li> <li>• WMTC</li> <li>• ECE R47</li> </ul> | alle                 |
| MK5            | Real         | Fahrdynamik (Dynamikparameter)                       | 9                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Städtische Segmente der Messmatrix Tabelle 3</li> </ul>                           | beide Mofas          |

Aus den zu Beginn durchgeführten Tests (MK1) bei realen Fahrscenarien wurden Zeit-Geschwindigkeitsdiagramme erstellt, welche schließlich im Rollenbetrieb evaluiert (MK2) und in weiterer Folge für die Emissionsmessungen (MK4) verwendet wurden (AP3: Messungen und Datenauswertung). Diese Testzyklen werden im Abschnitt 7.1.4 näher erläutert, wobei die Rollenmessungen explizit in Kapitel 7.2 behandelt werden und die entsprechenden Ergebnisse in Kapitel 8 vorgestellt werden. Zusätzliche wurden mit dem BMW F800 GT Motorrad RDE Messungen auf den für PKW bereits etablierten und in Verwendung befindlichen Teststrecken im Großraum Graz durchgeführt. Dies diente einerseits zur Bewertung und Evaluierung der Dynamikparameter, auch im Vergleich zu PKW, und andererseits um Motorparameter sowie Emissionen – RDE – im realen Fahrbetrieb zu messen.

Die folgenden Abschnitte 7.1 und 7.2 gehen speziell auf die Messungen im Realbetrieb sowie die Tests am Rollenprüfstand ein. Es werden gleichermaßen etwaig auftretende Herausforderungen sowie diverse Abgleiche und Evaluierungen der Messgeräte diskutiert.

### 7.1. Messungen im Realbetrieb

Messungen im Realbetrieb wurden mit allen angeführten Motorrädern und Mofas durchgeführt. Abbildung 6 zeigt den vollständigen Aufbau des oben beschriebenen PEMS auf dem BMW F800 GT Motorrad. Aus Gründen der Verkehrssicherheit und aus technischen Aspekten war dieser Aufbau auf allen kleineren Fahrzeugen nicht möglich – wie auch im Bild er-

sichtlich. Eine genaue Beschreibung des PEMS ist in Kapitel 6.1 angeführt. Auf Grund der Untauglichkeit dieses PEMS für kleinere Zweiradklassen wurde für die Messung der Dynamikparameter im Realbetrieb bei den anderen Motorrädern ein GPS-Logger mit Zusatzfunktionen verwendet, der entsprechend leichter montierbar und am Fahrzeug mitzuführen ist. Es wurde auch versucht, ein kompakteres PEMS Messsystem basierend auf Sensoren aufzubauen. Allerdings wurde damit keine ausreichende Genauigkeit erreicht (siehe Kap. 11).



**Abbildung 6: Emissions- und Fahrdynamik-Messungen mit einem BMW F800 GT Motorrad.**

Abbildung 127 zeigt den GPS-Logger, der zusätzliche Anschlüsse für die Drehzahlerfassung sowie weitere analoge Eingänge für weitere Signale besitzt. Die Drehzahlerfassung wurde wahlweise über einen Hallensensor an der Spule für die Zündkerze realisiert oder über den Stromabgriff direkt an der Zündkerze mit entsprechender elektrischer Schaltung für die Einbindung in einen analogen Kanal. Die Drosselklappenstellung konnte entweder direkt am integrierten Potentiometer oder mittels zusätzlicher Apparatur und externem Potentiometer am Gasgriff der Fahrzeuge über einen weiteren analogen Eingang gemessen werden. Die Stromversorgung der GPS-Loggers wurde über ein externes Akkupack gewährleistet, um das Bordspannungsnetz unbeeinflusst zu lassen.





**Abbildung 7: GPS-Logger mit zusätzlichen Anschlüssen für Drehzahlmessung und weitere analoge Eingänge auf einem BMW G650 GS Motorrad.**

### 7.1.1. Kinematische Bewertungskennzahlen

Die Überprüfung der Gültigkeit einer RDE-Fahrt erfolgt in der EU-Verordnung 2016/646 welche die RDE Gesetzgebung für PKW beschreibt, unter anderem über das 95-Perzentil des Produkts der Fahrzeuggeschwindigkeit mit positiver Beschleunigung  $(v \cdot a_{\text{pos}})_{95}$  (auch bezeichnet als  $v * a_{\text{pos}_{95}}$  oder  $(v \cdot a_{\text{pos}})_{[95]}$ ) und die relative positive Beschleunigung *RPA*. Diese als Fahrindikatoren bezeichneten Größen charakterisieren die Fahrdynamik und werden nachfolgend kurz beschrieben, wobei die Ermittlung der Fahrindikatoren Verordnung 2016/646 entnommen wurde.

#### $(v \cdot a_{\text{pos}})_{95}$

$(v \cdot a_{\text{pos}})_{95}$  ist das 95-Perzentil des Produkts der Fahrzeuggeschwindigkeit mal positiver Beschleunigung. Die Beschleunigung wird positiv gezählt, wenn sie größer als  $0,1 \text{ m/s}^2$  ist. Bevor mit der Ermittlung von  $(v \cdot a_{\text{pos}})_{95}$  begonnen werden kann, müssen die sekundlichen Messwerte  $v_i$ ,  $d_i$ ,  $a_i$  und  $(v \cdot a)_i$  laut Verordnung in aufsteigender Reihenfolge der Fahrzeuggeschwindigkeit geordnet und anschließend den entsprechenden Geschwindigkeitsintervallen für Innerorts, Ausserorts und Autobahn zugeordnet werden. Nach der Zuordnung der Werte in Intervalle errechnet sich das 95-Perzentil der Werte von  $v \cdot a_{\text{pos}}$  wie folgt.

Die Werte von  $(v \cdot a)_{i,k}$  innerhalb jedes Intervalls werden für alle Datensätze, deren Beschleunigung  $a \geq 0,1 \text{ m/s}^2$  ist, in aufsteigender Reihenfolge geordnet. Die Gesamtzahl der dabei zustande kommenden Stichproben  $M_k$  ist zu ermitteln.



Im Anschluss daran werden die Perzentil Werte den Werten  $(v \cdot a_{\text{pos}})_{j,k}$  nach dem nachfolgenden Schema zugeordnet.

Der niedrigste Wert  $(v \cdot a_{\text{pos}})_{j,k}$  erhält das Perzentil  $1/M_k$ , der zweitniedrigste das Perzentil  $2/M_k$ , der drittniedrigste das Perzentil  $3/M_k$  und der höchste das Perzentil  $M_k/M_k (= 1$  bzw. 100 %).

$(v \cdot a_{\text{pos}})_{95}$  bzw.  $(v \cdot a_{\text{pos}})_{k,95}$  ist nun jener Wert von  $(v \cdot a_{\text{pos}})_{j,k}$  für den  $j/M_k = 95 \%$  gilt. Wird  $j/M_k = 95 \%$  nicht erreicht bzw. eingehalten, so ist  $(v \cdot a_{\text{pos}})_{k,95}$  durch lineare Interpolation zwischen den aufeinander folgenden Stichproben  $j$  und  $j + 1$  bei  $j/M_k < 95 \%$  und bei  $(j + 1)/M_k > 95 \%$  zu berechnen.

|                 |   |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a_i$           | – | Beschleunigung im Zeitschritt $i$ [ $\text{m/s}^2$ ]                                                                                                                                                                                             |
| $d_i$           | – | im Zeitschritt $i$ zurückgelegte Strecke                                                                                                                                                                                                         |
| $k$             | – | Geschwindigkeitsintervall, $u$ (urban/Stadt), $r$ (rural/außerort) und $m$ (motorway/Autobahn); im Fall der Zyklen Ermittlung ist $k$ nicht der Platzhalter für $u$ , $r$ und $m$ sondern die jeweiligen Messstrecken-Verkehrsflusskombinationen |
| $M_k$           | – | Anzahl der im Intervall $k$ gefahrenen Stichproben mit Beschleunigung $a \geq 0,1 \text{ m/s}^2$ [-]                                                                                                                                             |
| $v_i$           | – | tatsächliche Fahrzeuggeschwindigkeit im Zeitschritt $i$ [ $\text{km/h}$ ]                                                                                                                                                                        |
| $(v \cdot a)_i$ | – | tatsächliche Fahrzeuggeschwindigkeit pro Beschleunigung im Zeitschritt $i$ [ $\text{m}^2/\text{s}^3$ oder $\text{W/kg}$ ]                                                                                                                        |

Das  $(v \cdot a_{\text{pos}})_{95}$  stellt also ein Maß für die höchsten Beschleunigungsleistungen im Test dar, die Üblicherweise besonders relevant für das Emissionsniveau sind.

## **RPA**

$RPA_k$  ist die relative positive Beschleunigung für die im Intervall (Messstrecken-Verkehrsflusskombination, z.B. S1\_f)  $k$  gefahrenen Anteile in  $\text{m/s}^2$  und berechnet sich nach Formel (7-1).

$$RPA_k = \frac{\sum_j \Delta t \cdot (v \cdot a_{\text{pos}})_{j,k}}{\sum_i d_{i,k}}, \quad j = 1 \text{ bis } M_k, \quad i = 1 \text{ bis } N_k \quad (7-1)$$

|            |   |                                                                                                      |
|------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $d_{i,k}$  | – | im Zeitschritt $i$ zurückgelegte Strecke eines Intervalls $k$ [m]                                    |
| $N_k$      | – | Anzahl der im Intervall $k$ gefahrenen Stichproben mit Beschleunigung $a \geq 0,1 \text{ m/s}^2$ [-] |
| $\Delta t$ | – | Dauer eines Zeitschritts $i$ ( $= 1 \text{ s}$ ) [s]                                                 |

$v_k$  –

$\bar{v}_k$  ist die durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit eines Intervalls  $k$  in  $\text{km/h}$  und wird nach Formel (7-2) berechnet.

$$\bar{v}_k = \frac{\sum_i v_{i,k}}{N_k}, \quad i = 1 \text{ bis } N_k \quad (7-2)$$

|           |   |                                                               |
|-----------|---|---------------------------------------------------------------|
| $v_{i,k}$ | – | tatsächliche Fahrzeuggeschwindigkeit im Zeitschritt $i$ unter |
|-----------|---|---------------------------------------------------------------|

## Berücksichtigung des Intervalls $k$ [km/h]

RPA stellt also ein Maß für die mittlere Beschleunigungsarbeit je Kilometer im Test dar.

### 7.1.2. Auswahl der Straßensegmente für die Tests

Für die Erhebung der HBEFA Faktoren wurde vorerst die Dynamik von Zweirädern im realen Straßenbetrieb untersucht. Dazu fanden die oben angeführten drei unterschiedlichen Motorräder, die BMW F800 GT, die BMW G650 GS und die KTM 125 Duke, Anwendung. Die beiden Mofas Peugeot Speedfight 3 und Honda Zoomer wurde in späterer Folge für die Erstellung eines Real Drive Cycle Mofa RDM vermessen, wie in Kapitel 7.1.4 näher erläutert.

Die Messungen wurden entsprechend Tabelle 3 für unterschiedliche Kombinationen von Fahrer, Fahrzeug, Straßentyp, Verkehrssituation und Geschwindigkeitslimit im Großraum Graz durchgeführt.

**Tabelle 3: Messmatrix der vermessenen Real World Testsegmente mit Charakterisierung und Verkehrssituationen nach HBEFA**

|                 | Segment Bezeichnung | Straßentyp                         | Charakterisierung     | Tempolimit [km/h] | Verkehrsfluss |          |
|-----------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------|---------------|----------|
| <b>Urban</b>    | S1                  | Hauptverkehrsstraße                | Stadtein- / -ausfahrt | 50-70             | frei          |          |
|                 | S2                  | Hauptverkehrsstraße                | Stadtein- / -ausfahrt | 50-60             | frei          |          |
|                 | S3                  | Hauptverkehrsstraße                | Stadtein- / -ausfahrt | 50                | frei          | gebunden |
|                 | S4                  | Hauptverkehrsstraße                | Stadtzentrum          | 50                | frei          | gebunden |
|                 | S5                  | Nebenstraße                        | generell              | 50                | frei          |          |
|                 | S6                  | Nebenstraße                        | generell              | 30                | frei          |          |
| <b>Überland</b> | AO-70               | Bundesstraßen mit Ortsdurchfahrten | Überland              | 70                | frei          | gebunden |
|                 | AO-80               |                                    |                       | 80                | frei          | gebunden |
|                 | AO-100              |                                    |                       | 100               | frei          | gebunden |
|                 | AO-K                | Kreisverkehr                       |                       | -                 | -             |          |
| <b>Autobahn</b> | A-80                | Autobahn A2 und A9                 | -                     | 80                | -             |          |
|                 | A-100               |                                    |                       | 100               | -             |          |
|                 | A-130               |                                    |                       | 130               | -             |          |
|                 | A-frei              |                                    |                       | -                 | -             |          |
|                 | Rastplatz           |                                    |                       | -                 | -             |          |

Abbildung 8 veranschaulicht die oben angeführten on-road Segmente für die Bestimmung der Dynamik von Motorrädern im Realbetrieb. Im linken Kartenausschnitt ist Graz mit den städtischen Strecken dargestellt. Der mittlere Ausschnitt zeigt die Überland-Strecken und der rechte Kartenausschnitt zeigt die Autobahnsegmente, die vermessen wurden.



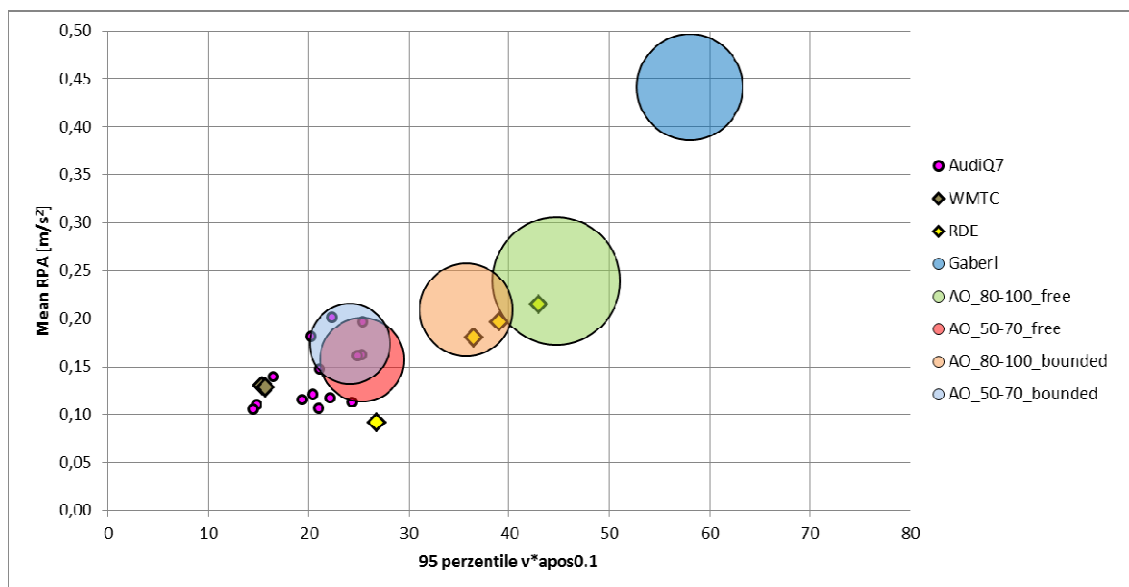
**Abbildung 8: Straßensegmente für die Bestimmung der Dynamik von Motorrädern im Realbetrieb (© OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA, bearbeitet in Microsoft PowerPoint).**

Zusätzlich zu den oben angeführten Vermessungen der einzelnen Straßensegmente wurden Referenzmessungen an bestehenden RDE Messstrecken, die an der TU Graz bereits für PKW etabliert sind und angewandt werden, durchgeführt.



**Abbildung 9: Etablierte und verwendete RDE Strecken des PKW für Referenzmessungen. (© OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA, bearbeitet in Microsoft PowerPoint).**

Zusätzlich zu den dargestellten Strecken wurde eine lokal bekannte Bergstraße als sportorientiertes Segment mit dem BMW F800 GT Motorrad vermessen, um zusätzlich zu den üblichen Streckenabschnitten noch den Bogen zum Motorradfahren als Freizeitaktivität zu spannen. Diese Messungen ergaben erwartungsgemäß eine viel höhere Fahrdynamik, welche in folgender Abbildung 10 im Vergleich zu anderen Messungen für die Überlandfahrten beispielhaft dargestellt wird.



**Abbildung 10: Gemessene Dynamikparameter-Verteilung in Überlandfahrten mit allen Motorrädern im Vergleich zu Messungen mit einem PKW (Audi Q7) und dem WMTC**

In obiger Abbildung ist die mittlere relative positive Beschleunigung ( $Mean\ RPA\ [m/s^2]$ ) über dem 95-prozentigen Intervall des Produktes aus Geschwindigkeit und positiver Beschleunigung ( $Mean\ 95\ Perzentil\ Intervall\ von\ v*a_{pos}\ [W/kg]$ ) für die vermessenen Überland Streckensegmente dargestellt. Die Kreise veranschaulichen die einzelnen differenzierten Überlandsegmente (nach Verkehrsfluss und Geschwindigkeitsbegrenzung), wobei deren Durchmesser die Streuung der Messwerte repräsentiert. Als Referenzmessungen wurden eingezeichnet:

- In Magenta: Arzberg und Ries Messungen mit einem Audi Q7 (85 W/kg)
- In Braun: WMTC Messungen mit der BMW F800 GT (245 W/kg)
- In Gelb: Arzberg und Ries Messungen mit der BMW F800 GT

In dieser Darstellung fällt vor allem die hohe Dynamik der Messungen auf der Strecke „Gaberl“ auf, wobei hier mit unterschiedlichen Fahren die gleiche Bergstraße in unterschiedlichen Fahrmodi (cruise, moderat, ambitioniert) und mit zwei unterschiedlichen Motorrädern (BMW F800 GT und BMW G650 GS) befahren wurde.

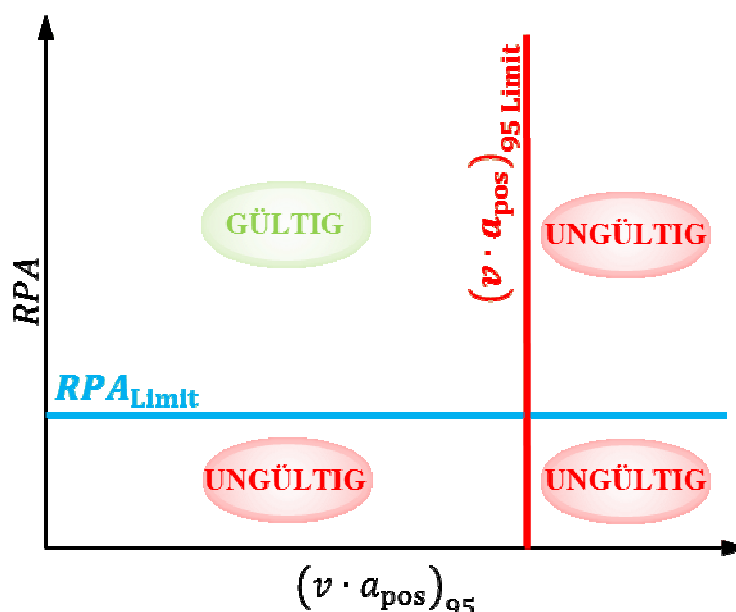
Im folgenden Kapitel 7.1.3 wird noch näher auf die Auswertung der Testsegmente in Bezug auf die Fahrdynamik eingegangen. Im Speziellen wird auf das hier dargestellte sportorientierte Bergstraßen-Segment noch näher bei der Erläuterung der Zyklererstellung in Kapitel 7.1.4 eingegangen.

### 7.1.3. Auswertung der Testsegmente in Bezug auf die Fahrdynamik

Die Auswertung der Dynamikparameter erfolgte gemäß Europäische Kommission, COMMISSION REGULATION (EU) 2016/646 vom 20 April 2016. Aus den Ergebnissen der Messkampagne 1 ergibt sich unter anderem folgendes Diagramm (Abbildung 12) für die Darstellung der beiden Dynamikparameter  $Mean\ RPA\ [m/s^2]$  und  $Mean\ 95\ Perzentil\ Intervall\ von\ v*a_{pos}\ [W/kg]$ . Die unterschiedlich eingefärbten Punktwolken (Blau, Grün, Violett) veranschaulichen die verschiedenen Bereiche Stadt, Überland und Autobahn, welche separat ausgewertet wurden. Zusätzlich wurden wieder einige gültige Messfahrten eines Audi Q7 als Referenzmessungen in dieses Diagramm eingebunden. Diese sind mit Magenta Punkten darge-

stellt. Entsprechend oben angeführtem Gesetzestext sind die jeweiligen Grenzen für die Bewertung der Gültigkeit einer Messfahrt für PKW mit strichlierten, schwarzen Linien dargestellt. Die Gültigkeit einer Messfahrt ist gegeben, wenn die berechneten Werte innerhalb der jeweils vorgesehenen Grenzen liegen, wie in Abbildung 11 dargestellt. Der Parameter Mean RPA gibt somit die Mindestanforderung an Dynamik einer Fahrt wieder, wobei der Parameter Mean 95 Perzentil Intervall von  $v \cdot a_{pos}$  die maximale Dynamik der Fahrt nach oben hin begrenzt.

Als erster Vorschlag der Dynamikgrenzen von Real World Fahrten von Zweirädern sind die roten Linien in Abbildung 12 eingezeichnet. Diese ergeben sich aus der Forderung, dass der Gutteil der durchgeführten Messfahrten aus oben angeführter Matrix von Fahrer/Fahrzeug-Kombinationen Gültigkeit haben und damit einen repräsentativen Mix für den Betrieb von Zweirädern ergeben soll. Die angegebenen Grenzen sind für Messungen als Grundlage für Emissionsfaktoren nicht als exakte Limits zu verstehen, sondern als erste Richtwerte. Wesentlich für die Bildung von Emissionsfaktoren ist vorwiegend eine gute Abdeckung der relevanten Betriebszustände. Eventuelle Grenzen für eine mögliche RDE Gesetzgebung wären durch weitere Messungen - auch in anderen Fahrzeugklassen - zu evaluieren (siehe dazu auch Kapitel 10).



**Abbildung 11: Schematische Darstellung der Gültigkeit einer Real World Messfahrt.**

Die vorgeschlagenen Verläufe der Grenzlinien für die beiden Dynamikparameter ergeben sich jeweils aus zwei Geraden nach folgender Formel:

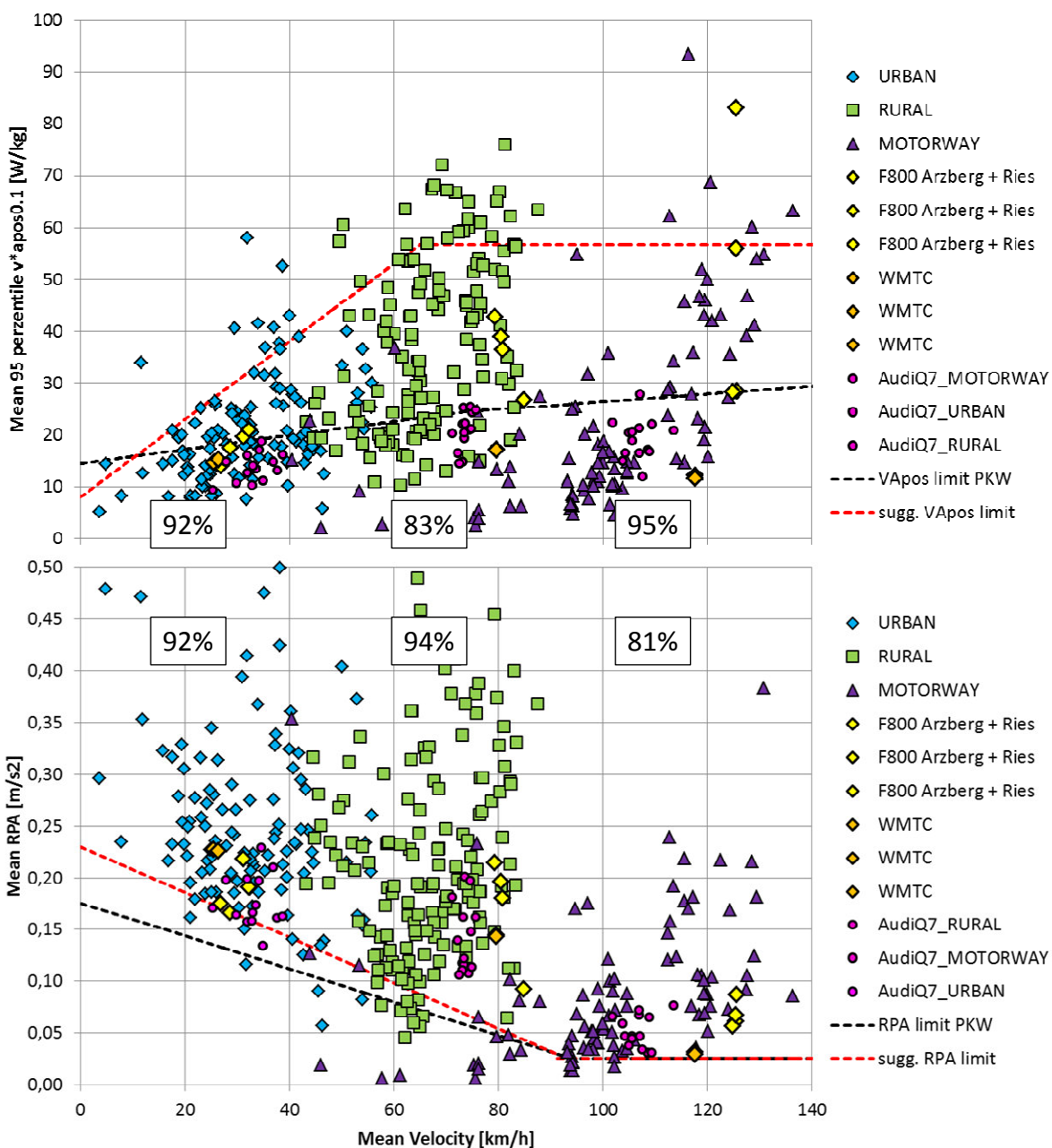
$$Limit = A * v_{m,i} + B$$

Dabei entsprechen die Konstanten A und B der Steigung und dem Normalabstand der jeweiligen Geraden (-abschnitte) nach Tabelle 4. Die Parameter der Geraden wurden jeweils so gelegt, dass sich eine einfache Umgrenzung des „normalen“ Fahrbereichs ergibt. Damit sind die Anteile von Tests innerhalb der Grenzen für Innerort, Ausserort und Autobahn nicht gleich (z.B. hätte man die Geraden auch jeweils durch die 95 Perzentile legen können). Als Richtwerte erscheinen einfache Linien in Anbetracht der limitierten Datenlage aber besser.



Tabelle 4: Steigung A und Normalabstand B der Grenzgeraden der Dynamikparameter

|                                   | A       | B      |
|-----------------------------------|---------|--------|
| V <sub>Apos</sub> ; erste Gerade  | 0.75    | 8      |
| V <sub>Apos</sub> ; zweite Gerade | 0       | 56.675 |
| RPA; erste Gerade                 | -0.0022 | 0.23   |
| RPA; zweite Gerade                | 0       | 0.025  |



Gesamt gültige Messfahrten je Bereich:

83.6%

76.9%

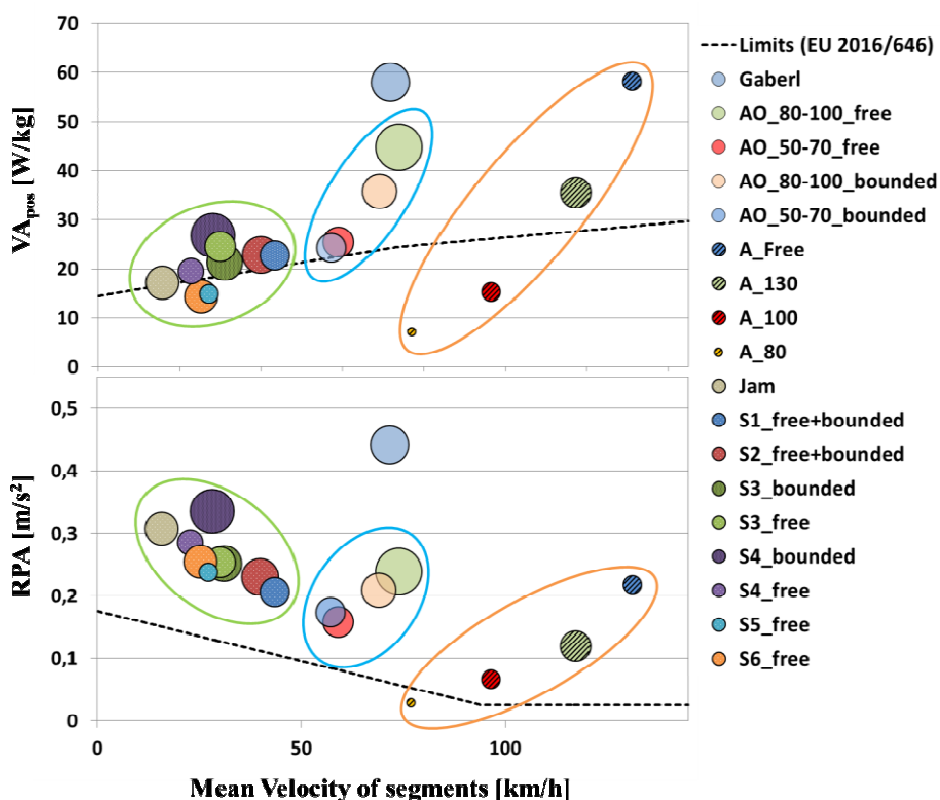
76.3%

Abbildung 12: Darstellung der vorgeschlagenen Grenzen für Dynamikparameter bei Zweirädern für On-Board Emissionsmessungen im Rahmen des HBEFA

Eine weitere Diversifizierung von Fahrzeugklassen in Kombination mit unterschiedlichen Fahrern auf weiteren Teststrecken könnte in Zukunft die Bestimmung der Grenzlinsen verfeinern.

### 7.1.4. Ausarbeitung von Real World Testzyklen für die Zweiradrolle

Basierend auf den oben vorgestellten Messungen zur Fahrdynamik von Zweirädern wurden alle einzelnen Testsegmente analysiert, um aus der Vielzahl von Messungen entsprechend repräsentative Real World Testzyklen für die Zweiradrolle generieren zu können. Abbildung 13 visualisiert diese Analyse in einem Diagramm, wobei hier die einzelnen Testsegmente mit Kreisen, deren Durchmesser die Streuung der jeweiligen Messwerte darstellt, abgebildet sind. Zusätzlich sind die Bereiche Stadt (Grün), Überland (Blau) und Autobahn (Orange) markiert.



**Abbildung 13: Darstellung der durchschnittlichen Dynamikparameter der einzelnen Testsegmente in den Verkehrssituationen nach HBEFA (vgl Tabelle 3) sowie Limits der Dynamikparameter für PKW für gültige RDE Tests zum Vergleich**

Auf Basis dieser Daten wurde unter Zuhilfenahme von Matlab ein Programm entwickelt welches aus allen gemessenen Einzelsegmenten einen repräsentativen Abschnitt findet, der in weiterer Folge für die Erstellung eines synthetischen Real World Testzyklus verwendet wurde. Folgende Darstellung veranschaulicht schematisch die Auswahl solcher repräsentativen Teilausschnitte. Der Workflow gliedert sich wie folgt:

1. Für jede Messstrecke (Verkehrssituation nach HBEFA) werden die gemittelten Dynamikparameter dieser ermittelt (Rote Kästen).

2. Je nach gewünschtem gesamtem Real World Testzyklus wird festgelegt, welche Messstrecke in welchem Zeitausmaß vorkommen soll. Beispielsweise wurde hier ein Real World Testzyklus erstellt der aus jeder Messstrecke einen repräsentativen 100 Sekunden langen Abschnitt enthalten soll (Grüne Kästen). Das ergibt bei beispielsweise 9 ausgewählten unterschiedlichen Messstrecken (vergleiche Tabelle 3) eine Gesamtlänge von 900s für einen Real World Testzyklus.
3. Das Programm ermittelt nun für alle Einzelmessungen einer jeweiligen Messstrecke für alle darin vorkommenden 100 Sekunden langen Intervalle die Mittelwerte der Dynamikparameter.
4. Eine Minimumsuche liefert schlussendlich alle 100 Sekunden langen Intervalle der Einzelmessungen einer Messstrecke, welche die geringste Abweichung zu den gemittelten Dynamikparametern dieser Messstrecke ergeben (siehe grün hinterlegt Formel in Abbildung 14).
5. Mit den nun erhaltenen, im Sinne der Mittelwertbildung über alle gemessenen Messstrecken repräsentativen 100 Sekunden langen Abschnitten kann nun ein Real World Testzyklus erstellt werden, der die realen Fahrsituationen entsprechend dem Mix an zuvor durchgeführten Messungen widerspiegelt.
6. Die Übergänge der einzelnen Abschnitte können a priori nicht stetig sein, was durch die Verwendung von realen Geschwindigkeitsverläufen mit dem Programm gelöst wird. Abbildung 15 stellt dies schematisch dar. Hier wird beispielhaft ein realer Geschwindigkeitsverlauf aus dem Segment Messstrecke B übernommen um den Geschwindigkeitsverlauf im Übergang zwischen den Segmenten der Messstrecke A und B stetig zu gestalten.



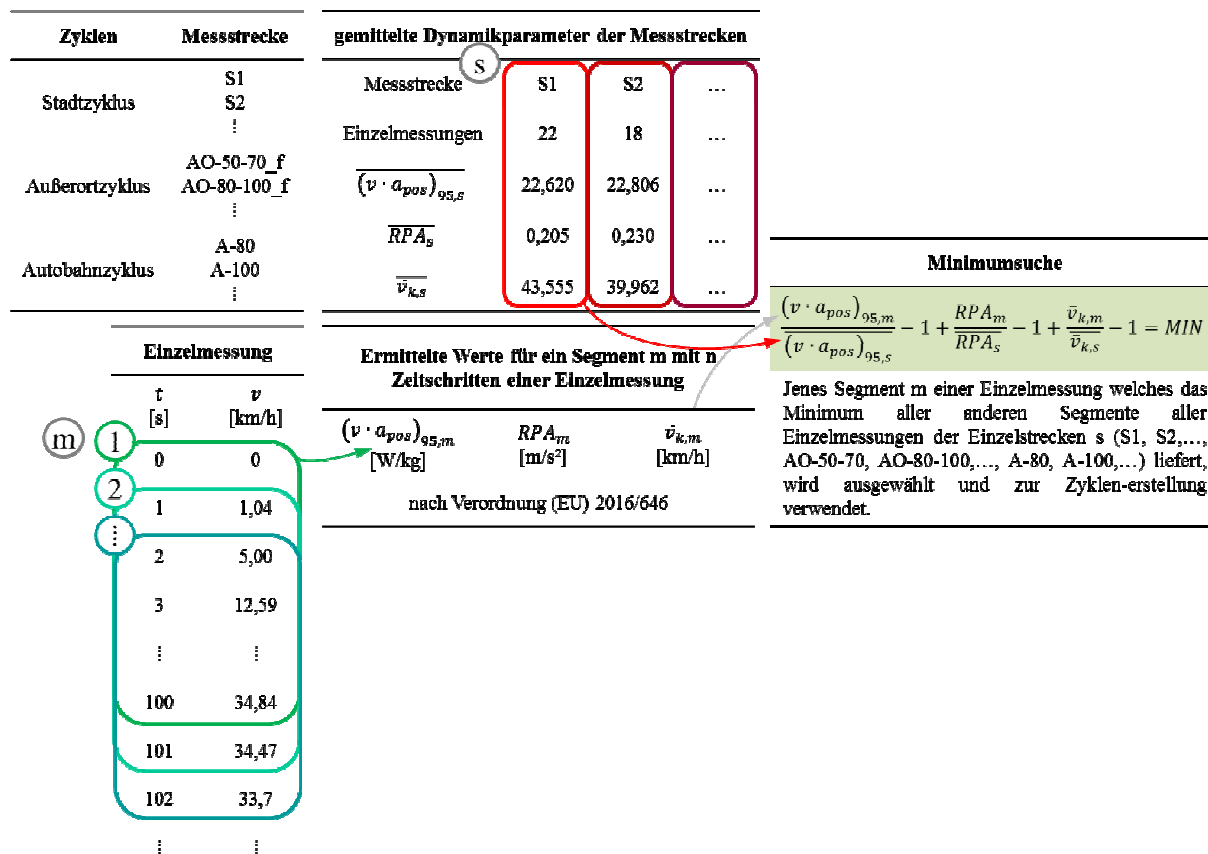


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Programms zur Erstellung von Real World Testzyklen aus Einzelmessungen von Straßensegmenten nach HBEFA.

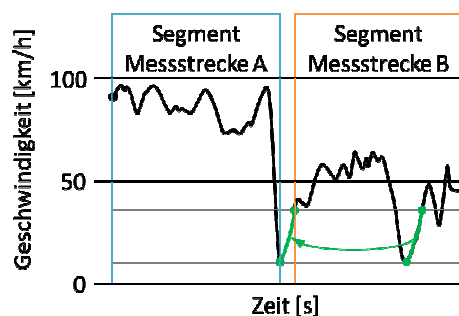
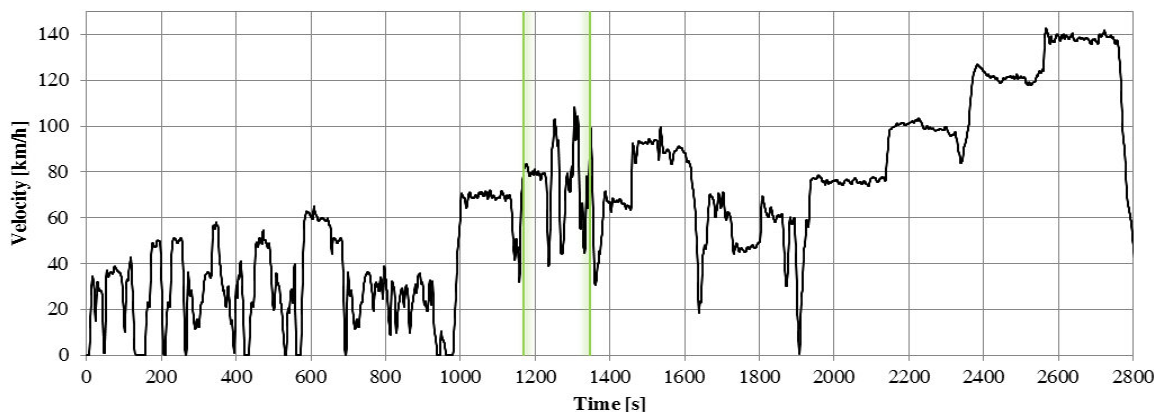


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Methode zum Erstellen von realen Übergängen zwischen den verwendeten Einzelsegmenten zum Zusammenfügen eines synthetischen Real World Testzyklus.

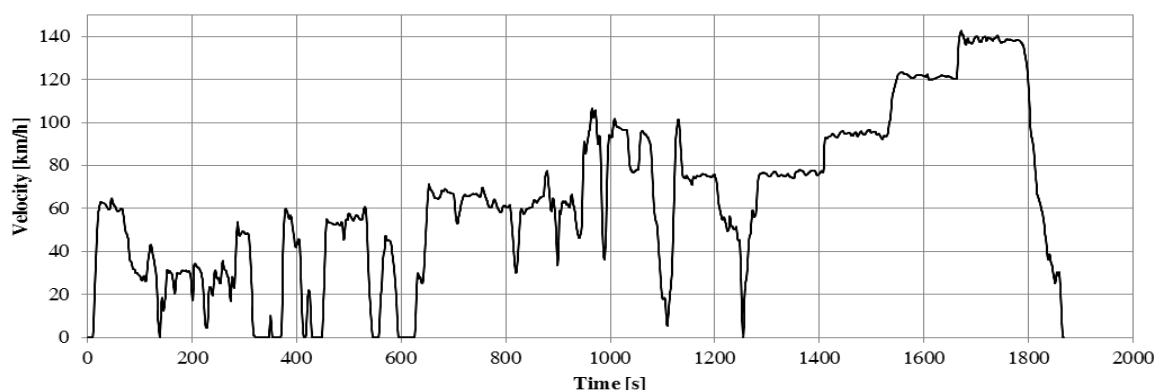
Mit diesem Programm wurden auf Basis der Daten aus der Messkampagne 1 mehrere synthetische Real World Testzyklen generiert, wobei zwei dieser Zyklen (Real Drive Cycle 1, „RDC1“ und Real Drive Cycle 2, „RDC2“) für Motorräder bei späteren Tests verwendet wurden.

Für die Erstellung von Real World Testzyklen für Mofas wurden in der Messkampagne 5 weitere Tests im Realfahrbetrieb mit den zwei oben angeführten Fahrzeugen durchgeführt. Diese Tests dienten als Datengrundlage für die im Folgenden dargestellten Mofa-Testzyklen.

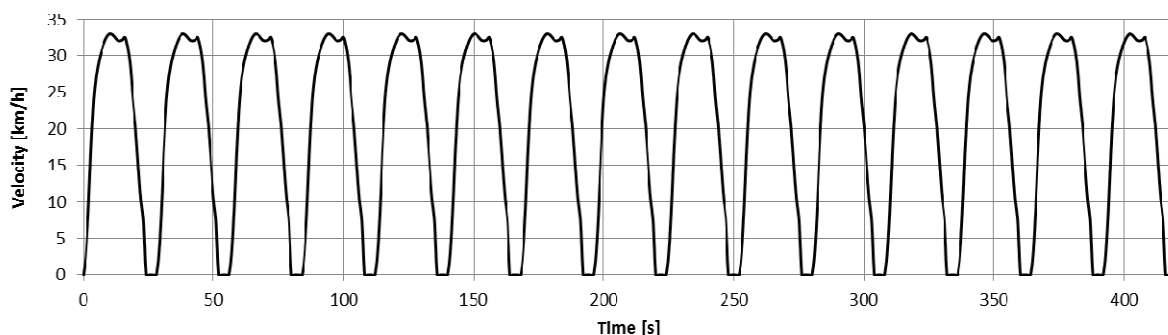
Nachstehend sind zwei Real Drive Cycles (RDC) für Motorräder, ein Testzyklus für Mofas (RDM) sowie jeweils ein Kaltstartzyklus für Motorräder und Mofas dargestellt. Der Zyklus RDC1 beinhaltet zusätzlich ein in grün gekennzeichnetes Segment mit konstant angenommener Steigung von 7%. Dieses Teilsegment wurde implementiert um sport-orientierten Fahrten auf kurvigen und hügeligen Straßenabschnitten Rechnung zu tragen (vergleiche dazu Kapitel 8.2).



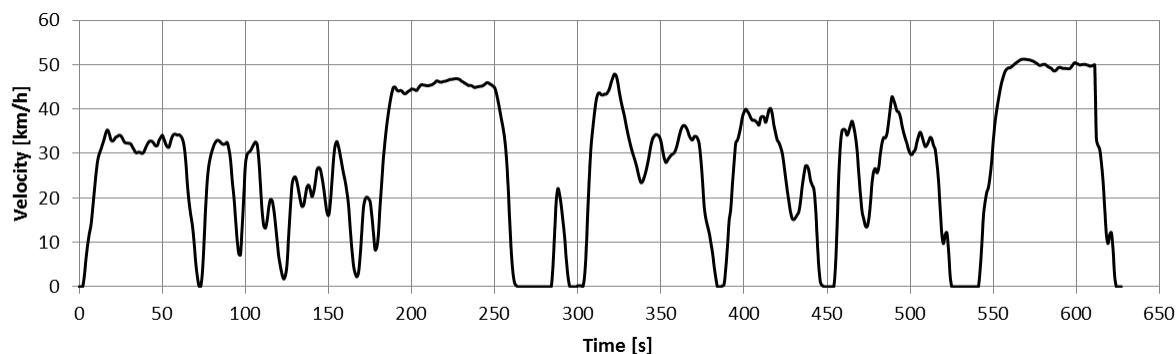
**Abbildung 16: Real Drive Cycle 1 (RDC1) inklusive sport-orientiertem Abschnitt**



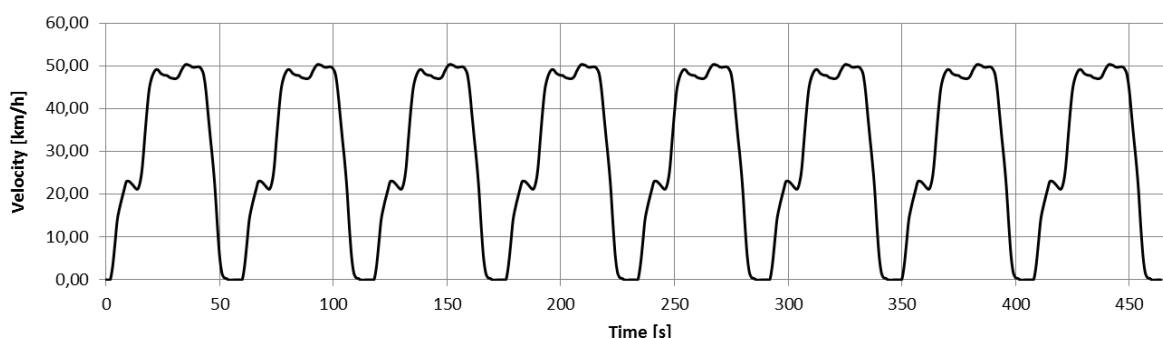
**Abbildung 17: Real Drive Cycle 2 (RDC2)**



**Abbildung 18: Voll-Kaltstartzyklus Motorrad**



**Abbildung 19: Real Drive Cycle Moped (RDM)**



**Abbildung 20: Voll-Kaltstartzyklus Mofa**

Die Kaltstartzyklen sind je nach Kaltstartstrategie des jeweiligen Fahrzeuges unter Umständen zu lange angelegt, da die Abgasreinigungssysteme bereits lange vor Ende des Tests auf Betriebstemperatur sind und funktionieren. Dennoch sollte der gesamte Zyklus absolviert werden um auch die Vergleichbarkeit zu älteren Geräten mit langer Warmlaufphase zu gewährleisten. Da die Wiederholungen jedenfalls bis zum betriebswarmen Zustand erfolgen müssen, um den Test bezüglich der Kaltstartzusatzemissionen auswerten zu können, ist eine längere Dauer auf jeden Fall sinnvoll. Nutzen dieser Messung ist die Darstellbarkeit des Verhältnisses  $E_K/E_W(t)$  – Emissionen kalt zu Emissionen warm über der Zeit sowie auch  $E_K - E_W(t)$  – was Rückschlüsse über die Änderung der Effizienz der Abgasnachbehandlung über der Zeit nach Start ermöglicht. Die Methode muss einen Zyklus verwenden, der regelmäßig dieselben Geschwindigkeitssequenzen wiederholt. Damit können für jede Sequenz die Unterschiede zum warmen Emissionsniveau (Sequenzen am Testende) einfach berechnet werden. Für PKW ist eine ähnliche Methode bereits zur Bestimmung von Kaltstartemissionen im HBEFA in Verwendung. Die Kaltstartzyklen wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes erst gegen Ende entworfen und daher nicht im Messprogramm erfasst.

Die systematische Sammlung an Messfahrten kann bei Bedarf auch zur Erstellung von repräsentativen Geschwindigkeitszyklen für die Verkehrssituationen verwendet werden. Diese wären ja notwendig, um mit dem Modell PHEM (Kap. 9) Emissionsfaktoren für die Verkehrssituationen zu berechnen. Für die Simulation mit PHEM sollten allerdings deutlich längere Zyklen als die zuvor beschriebenen 100 Sekunden Intervalle erzeugt werden. Bei PKW haben sich Zyklusdauern von weniger als ca. 5 Minuten als nicht robust in der Simulation gezeigt.

## 7.2. Messungen auf der Zweiradrolle

Die Messungen auf der Zweiradrolle wurden mit der in Kapitel 6.2 vorgestellten Messkonfiguration durchgeführt. Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen zum einen den schematischen Aufbau und zum anderen einen Überblick über den Prüfstand an der Technischen Universität Graz. Wie oben beschrieben, wurden die Tests mit unterschiedlichsten Messgeräten gleichzeitig durchgeführt. Beispielsweise konnten Emissionen mit einer AVL AMAi60 Analyse, mit einem IAG FTIR und mit einer AVL M.O.V.E. GAS PEMS iS gleichzeitig gemessen werden, was die gegenseitige Evaluierung der Messtechnik zulässt. Stationär am Prüfstand verfügbar ist die AVL Analyse, welche weiter unten detaillierter geschrieben wird. Die beiden anderen Spezialmessgeräte und deren Messprinzipien werden in Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2 vorgestellt.

Für die Messungen auf der Zweiradrolle wurde die nachfolgend beschriebene Prüfeinrichtung der Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (FVT mbH) verwendet:

### Technische Daten 2-Rad Rollenprüfstand FVT mbH

#### Bremse:

AVL Zöllner: 42 KW @ 90 km/h

Typ: elektromechanisch

Max. Geschwindigkeit: 160 km/h

Fahrzeugmasse: 350 kg

Rollendurchmesser: 20"

CVS Durchfluss: 2, 4 oder 6 m<sup>3</sup>/min

geregelter Fahrtwindlüfter: +/- 10% der Fahrgeschwindigkeit (max. 160 km/h) max. 48.000 m<sup>3</sup>/h

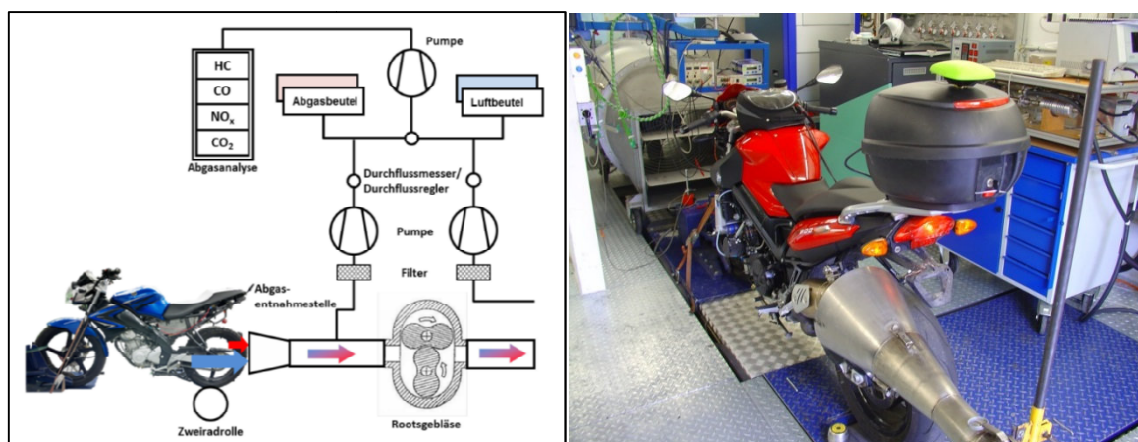


Abbildung 21: 2-Rad Rollenprüfstand FVT mbH (rechts schematisch)

#### **Betriebsarten**

Der Prüfstand kann im stationären und instationären Betrieb gefahren werden, wobei sowohl Brems- als auch Schleppbetrieb möglich ist.

Stationärbetrieb (Leistungsprüfstand): Die Regelung bei dieser Betriebsart erfolgt entweder bei konstanter Bremskraft oder bei konstanter Fahrgeschwindigkeit.

Instationärbetrieb: In dieser Betriebsart wird die Rollenbremskraft aus der aktuellen Geschwindigkeit und Beschleunigung des Kfz entsprechend der vorgegebenen Daten zu Fahrzeugmasse und Widerstandsbeiwerten geregelt. Typische Anwendung ist die Typprüfung für Motorräder. Es können aber beliebige Fahrzyklen vorgegeben werden, die dem Fahrer vom Fahrleitgerät über einen Bildschirm angezeigt werden.

### **Abgasanalyse**

Die Messung der Emissionen am Prüfstand erfolgt über eine offene CVS-Anlage und Abgasanalysatoren der Firma AVL (AMA i60). Die Emissionen können als Beutelwert und im zeitlichen Verlauf (max. 10 Hz) erfasst und ausgegeben werden.

Es stehen zusätzlich Möglichkeiten zur Erfassung von Drücken, Temperaturen, Spannungen und Stromstärken zur Verfügung. Die Umgebungsdaten im Prüfraum (Temperatur, Luftfeuchte) sind konditionierbar und werden gemeinsam mit dem Luftdruck aufgezeichnet. Für einen Betrieb mit mehreren Fahrzeugen nacheinander steht eine eigene Konditionierkammer zur Verfügung.

Die Messungen wurden in mehreren Messkampagnen, wie in Tabelle 2 dargestellt, durchgeführt, wobei diverse Nachmessungen oder Zusatzmessungen hier nicht explizit angeführt werden.

## **8. Messergebnisse**

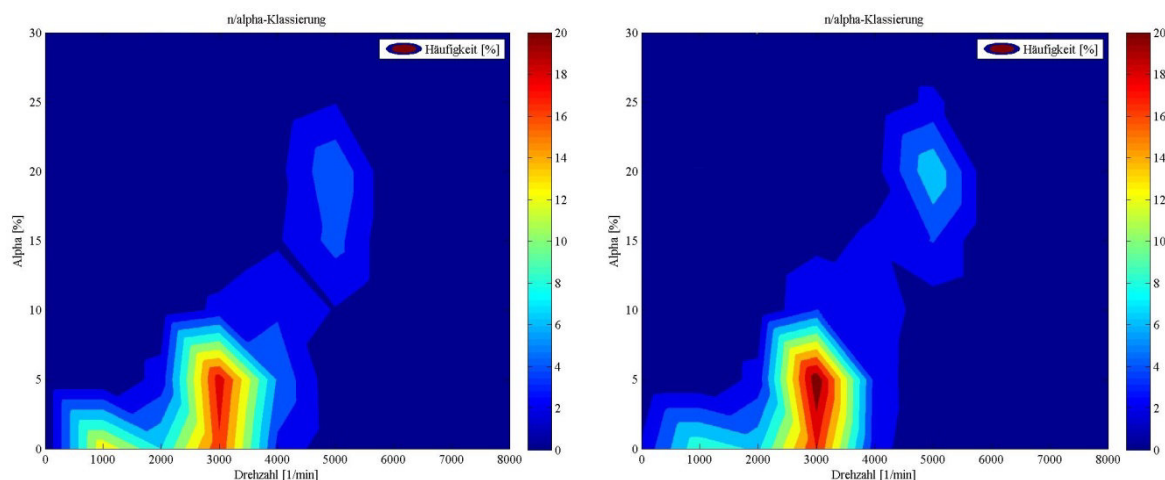
Die folgende Abhandlung beschreibt die Datenauswertung und die Ergebnisse der durchgeführten Messungen (AP3: Messungen und Datenauswertung). Vorerst werden Einflussfaktoren der Messtechnik auf die Messungen diskutiert um in weiterer Folge die Ergebnisse der Fahrdynamikuntersuchungen, der limitierten und der nicht limitierten Emissionskomponenten vorzustellen. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die in Kapitel 9 beschriebene Simulation von Leistung und Drehzahl sowie für der Kennfelderstellung und Abgasnachbehandlung mittels der Software PHEM.

### **8.1. Einflussfaktoren der Messtechnik auf die Messergebnisse im Realbetrieb**

Das vollständige PEMS hat in etwa 80kg Gesamtgewicht und entspricht damit einem/r vollwertigen Beifahrer/Beifahrerin. Da die gesamte portable Messtechnik im eigentlichen Sinne für automotiv Anwendungen entwickelt wurde, ist dieselbe auch in ihren Abmaßen sehr ausladend. Naturgemäß ergibt sich daraus eine Beeinflussung der Messergebnisse durch die Messtechnik im Realbetrieb. Weiters muss beachtet werden, dass die Auswirkungen der Messtechnik auf unterschiedliche Fahrzeuge differieren. Beispielhaft wurden im Rahmen dieses Projektes die Einflüsse bei oben vorgestelltem BMW F800 GT Motorrad untersucht.

Beispielhaft zeigt folgende Abbildung 22 eine Drehzahl/Drosselklappen-Klassierung der BMW F800 GT im Realbetrieb mit (links) und ohne (rechts) vollständigem PEMS. Es ist zu erkennen, dass sich durch den Messaufbau eine Lastpunktverschiebung im Motorkennfeld ergibt. Diese ist beim hier verwendeten Motorrad noch relativ schwach ausgeprägt, was sich aber dennoch in den Emissionen niederschlägt, wie im folgenden Kapitel 8.1.2 gezeigt wird. Betrachtet man nun das nächst kleinere Motorrad aus der Messkampagne – BMW G650 GS – so würden die 80kg an Messtechnik noch einmal fünf Prozentpunkte in Relation zum Leergewicht im Vergleich zur BMW F800 GT ausmachen, was sich bei der geringeren Motorleistung merklich auf die Emissionen niederschlagen kann. Da die Motorräder i.A. für Sozibus-

trieb zugelassen sind, wäre ein solches Mehrgewicht nicht unrealistisch, allerdings für die übliche Nutzung vermutlich nicht typisch. Die Messergebnisse von PEMS Tests sollten also ohne weitere Verarbeitung nicht als repräsentative Emissionswerte für reales Fahren verwendet werden.



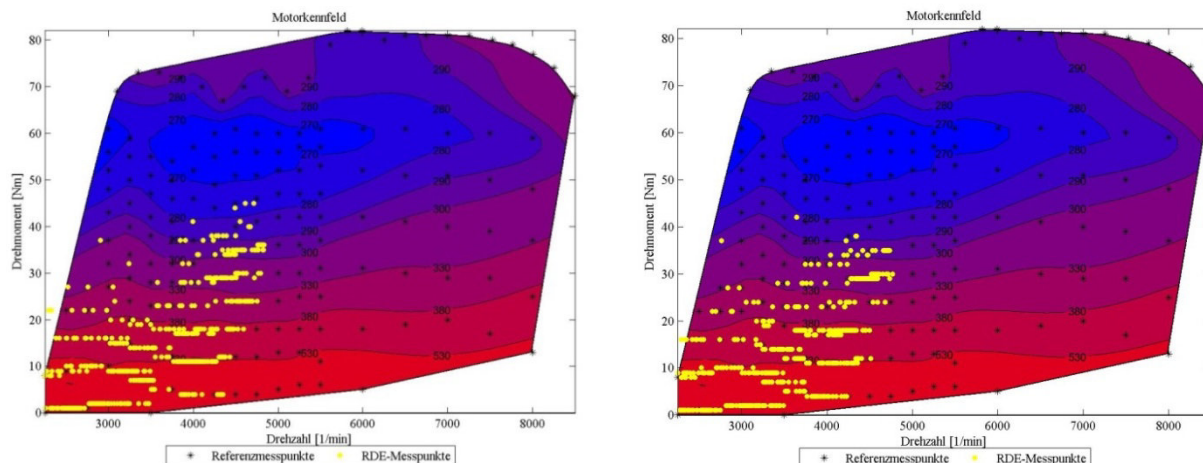
**Abbildung 22: Drehzahl/Drosselklappe-Klassierung mit (links) und ohne (rechts) vollständigem PEMS für ein BMW F800 GT Motorrad im Realbetrieb.**

In den folgenden beiden Kapiteln wird näher auf die Einflüsse des Zusatzgewichtes der Messtechnik im Realbetrieb sowie auf die Möglichen Einflüsse des EFM eingegangen. In Kapitel 10.2 wird zudem auf die Möglichkeiten und Sinnhaftigkeit von PEMS bei Zweirädern eingegangen, um dem Umstand der nicht unerheblichen Zusatzlasten von heute verfügbaren mobilen Analysen Rechnung zu tragen.

### 8.1.1. Einflüsse des Messaufbaus auf Motor- und Emissionsparameter

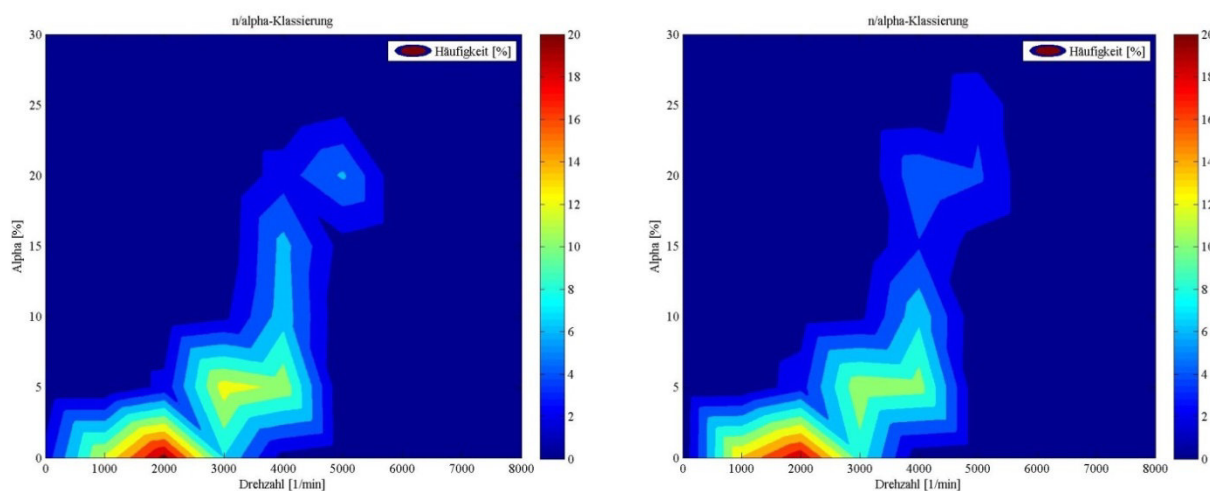
Die genauen Einflüsse des Messaufbaus auf Motor- und Emissionsparameter wurden am Rollenprüfstand mit einem WMTC als Testzyklus und einem BMW F800 GT Motorrad als Versuchsfahrzeug untersucht. Nachstehende Abbildung 23 zeigt die beiden Motorkennfelder mit hinterlegtem Kraftstoffverbrauch bei 350kg (links) und 270kg Gesamtmasse (rechts). Die gelben Punkte stellen Lastpunkte im Motorkennfeld dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich durch die erhöhte Fahrzeugmasse eine entsprechend Lastpunktverschiebung zu höheren Werten hin ergibt.





**Abbildung 23: Motorkennfelder mit hinterlegtem Kraftstoffverbrauch für einen WMTC bei 350kg (links) und 270kg Gesamtmasse (rechts) am Rollenprüfstand mit einem BMW F800 GT Motorrad.**

Abbildung 24 zeigt die dazugehörige Häufigkeitsverteilung im Drehzahl-Drosselklappen-Kennfeld für die beiden unterschiedlichen Gesamtmassen. Es ist wiederum die Lastpunktverschiebung zu erkennen.



**Abbildung 24: Drehzahl/Drosselklappen-Klassierung für die Messung eines WMTC mit 350kg (links) und 270kg Gesamtmasse (rechts) am Rollenprüfstand mit der BMW F800 GT**

Im Hinblick auf die Emissionen verdeutlicht die Lastpunktverschiebung in Abbildung 23, dass der Motor trotz der höheren Fahrzeuggesamtmasse in einem optimaleren Betriebsbereich in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch betrieben wird. Dies schlägt sich im dargestellten Kraftstoffverbrauch nieder. Die dazugehörige Auswertung der Emissionen sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 dargestellt.

Es kann festgestellt werden, dass sich die Abweichung in den limitierten Emissionen HC, CO und CO<sub>2</sub> innerhalb der Messtoleranzen bewegen. Allerdings sind die NO<sub>x</sub> Emissionen signifikant höher. An sich war bei höheren Motorlasten eher eine fettere Verbrennung erwartet worden, was aber eher CO und HC Emissionen steigern würde. Eventuell hat eine unzureichende Lambda Regelung die Sauerstoffspeicherfähigkeit im Katalysator öfters überschritten und so die NO<sub>x</sub>-Konvertierung negativ beeinflusst.

**Tabelle 5: Auswertung der Emissionen für einen WMTC (Stage 2 3-2) für eine BMW F800 GT mit 350kg Gesamtmasse.**

|                                  | Overall<br>[mg/km] | DF<br>[-]                | Overall<br>mit DF<br>[mg/km] | Limit<br>[mg/km] | Prozent bezogen auf<br>EU Limit |        |
|----------------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------|------------------|---------------------------------|--------|
|                                  |                    |                          |                              |                  | ohne DF                         | mit DF |
| HC                               | 102                | 1,2                      | 123                          | 170              | 60 %                            | 72 %   |
| CO                               | 796                | 1,3                      | 1035                         | 1140             | 70 %                            | 91 %   |
| NO <sub>x</sub>                  | 184                | 1,2                      | 221                          | 90               | 204 %                           | 245 %  |
| CO <sub>2</sub>                  | 106154             | -                        | -                            | -                | -                               | -      |
| Kraftstoffverbrauch<br>[l/100km] | 4,57               | (Aus C-Bilanz berechnet) |                              |                  |                                 |        |

**Tabelle 6: Auswertung der Emissionen für einen WMTC (Stage 2 3-2) für einen BMW F800 GT mit 270kg Gesamtmasse.**

|                                  | Overall<br>[mg/km] | DF<br>[-]                | Overall<br>mit DF<br>[mg/km] | Limit<br>[mg/km] | Prozent bezogen auf<br>EU Limit |        |
|----------------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------|------------------|---------------------------------|--------|
|                                  |                    |                          |                              |                  | ohne DF                         | mit DF |
| HC                               | 132                | 1,2                      | 158                          | 170              | 77 %                            | 93 %   |
| CO                               | 763                | 1,3                      | 991                          | 1140             | 67 %                            | 87 %   |
| NO <sub>x</sub>                  | 116                | 1,2                      | 140                          | 90               | 129 %                           | 155 %  |
| CO <sub>2</sub>                  | 109156             | -                        | -                            | -                | -                               | -      |
| Kraftstoffverbrauch<br>[l/100km] | 4,80               | (Aus C-Bilanz berechnet) |                              |                  |                                 |        |

Aus den hier vorgestellten Untersuchungen kann eine Beeinflussung der Emissionen durch das verwendete PEMS bei dem BMW F800 GT Motorrad nachgewiesen werden. Dementsprechend muss beachtet werden, dass mit heute verfügbaren PEMS deren Verwendung im Realbetrieb auf eine bestimmte Mindestleistung der Fahrzeugs sowie eine entsprechend möglich hohe Zuladung ohne signifikante Beeinflussung der Fahrdynamik und Verkehrssicherheit geprüft werden muss. Im Bezug darauf werden in Kapitel 10.2 die optimalen Anteile an PEMS-Messungen und Rollenmessungen diskutiert.

### 8.1.2. Einfluss des EFM

Wie bereits oben näher beschrieben, basiert das Messprinzip des EFM auf Differenzdruckmessung, was dieses Messgerät empfindlich auf die Montagelage auf Grund des entstehenden Abgaskondensates macht. Zusätzlich zu der bestmöglichen Einbaulage wurde daher eine Kalibrierprozedur verwendet, um die Funktionsfähigkeit des Gerätes und die Reproduzierbarkeit der Messwerte zu gewährleisten.

Vergleicht man Abbildung 4 und Abbildung 5 mit Abbildung 6, so ist erkennbar, dass für die Anordnung des EFM für PEMS Messungen ein Kompromiss aus Verkehrssicherheit und optimaler Installation in Bezug auf die Strömungsverhältnisse gefunden werden muss. Daher wurde ein möglicher Einfluss der hier gezeigten Montagepositionen auf Emissionen (inklusive Massenstromwerte) und Kraftstoffverbrauch untersucht. Dazu wurden Vergleichsmessungen mit dem WMTC als Testzyklus am Rollenprüfstand durchgeführt. Beachtet man die natürliche Streuung der Messwerte auf Grund des subjektiven Fahrverhaltens von unterschied-



lichen Fahrern so wird erkennbar, dass die unterschiedlichen Konfigurationen des EFM keinen signifikanten Einfluss auf Emissionswerte und Kraftstoffverbrauch haben. Die folgende Tabelle 7 zeigt unterschiedliche Ergebnisse von Messungen eines WMTC mit unterschiedlichen Fahrern mit einer BMW F800 GT. Dazugehörig sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 die Vergleichsmessungen eine WMTC mit und ohne EFM angeführt.

**Tabelle 7: Vergleich von Emissionen und Kraftstoffverbrauch bei Messungen eines WMTC mit unterschiedlichen Fahrern mit einer BMW F800 GT.**

| Datum                      | Emissionen [mg/km] |            |            |            |            | $\bar{x}$ | s       |
|----------------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|---------|
|                            | 20.07.2016         | 21.07.2016 | 22.07.2016 | 29.07.2016 | 01.08.2016 |           |         |
| HC                         | 102                | 108        | 107        | 132        | 128        | 115,4     | 13,59   |
| CO                         | 651                | 645        | 684        | 763        | 727        | 694       | 50,50   |
| NO <sub>x</sub>            | 106                | 124        | 118        | 116        | 119        | 116,6     | 6,62    |
| CO <sub>2</sub>            | 106464             | 105478     | 109074     | 109156     | 111734     | 108381,2  | 2471,12 |
| Kraftstoffverbrauch [km/l] | 21,60              | 21,84      | 21,02      | 20,84      | 20,24      | 21,11     | 0,63    |

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$\bar{x}$  – Mittelwert

$x_i$  – Einzelwert

n – Anzahl der Messungen

s – Stichprobenstandardabweichung

Vergleicht man die in Tabelle 8 ermittelten Werte mit Mittelwert und Standardabweichung aus den oben zusammengefassten WMTC Messungen, so ist zu erkennen, dass keine signifikante Beeinflussung des Messrohres des EFM auf Emissionen und Kraftstoffverbrauch gegeben ist.

**Tabelle 8: Vergleich von Emissionen und Kraftstoffverbrauch mit und ohne EFM.**

| Datum                      | Emissionen [mg/km] |            |
|----------------------------|--------------------|------------|
|                            | mit EFM            | ohne EFM   |
| 08.08.2016                 |                    | 09.08.2016 |
| HC                         | 113                | 100        |
| CO                         | 745                | 731        |
| NO <sub>x</sub>            | 108                | 109        |
| CO <sub>2</sub>            | 109703             | 110510     |
| Kraftstoffverbrauch [km/l] | 20,84              | 20,78      |

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die Strömungssituation im Messrohr dennoch sensibel auf die Vor- und Nachlaufstrecke der Messstrecke reagieren kann. Im Allgemeinen wird für das verwendete Messprinzip laut Norm eine bestimmte Beruhigungsstrecke vor und nach dem Gerät vorgeschrieben. Bei allen Messungen am Rollenprüfstand wurde dies berücksichtigt.

## 8.2. Ergebnisse der Fahrdynamikuntersuchungen

Wie bereits in Kapitel 7.1.3 und Kapitel 7.1.4 ausgeführt und in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt, wurde die Dynamik der Versuchsfahrten im Realbetrieb mit den Dynamikparametern Mean RPA [m/s<sup>2</sup>] und Mean 95 Perzentil Intervall von v\*a<sub>pos</sub> [W/kg] bewertet.

In Kap. 7.1.4 wurden damit die vorgeschlagenen Real World Rollenzyklen (RDCs) ausgearbeitet. Hier wird überprüft, wie gut die gewählten RDCs in das Fahrprofil der Motorräder passen.

Als Referenzwerte dienen RDE Messungen eines Audi Q7, welche auch in den nachfolgenden Abbildungen in Magenta dargestellt sind. Trennt man die untersuchten Streckensegmente nach HBEFA in die Anteile Stadt, Überland und Autobahn so ergeben sich die nachfolgenden Darstellungen der Fahrdynamik von Abbildung 25 bis Abbildung 27. Wie schon in den oberen Abbildungen werden zusätzlich die Messwerte für WMTC Messungen (gelbe Rauten) und die Referenzwerte der vermessenen bereits etablierten RDE Strecken der PKW (orange Rauten) dargestellt. Die transparent eingefärbten Kreise repräsentieren die Messwerte der einzelnen Straßensegmente mit den jeweiligen Verkehrssituationen nach HBEFA, wobei deren Durchmesser ein Maß für die Streuung der Dynamikparameter ist.

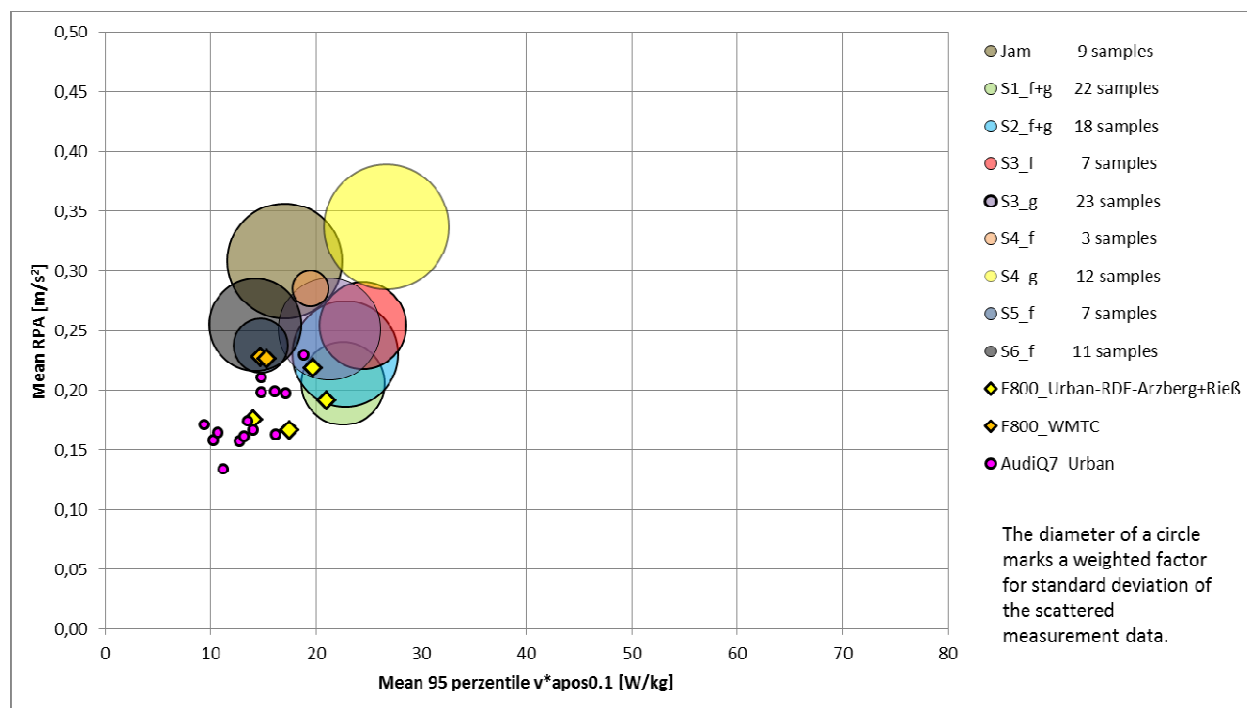
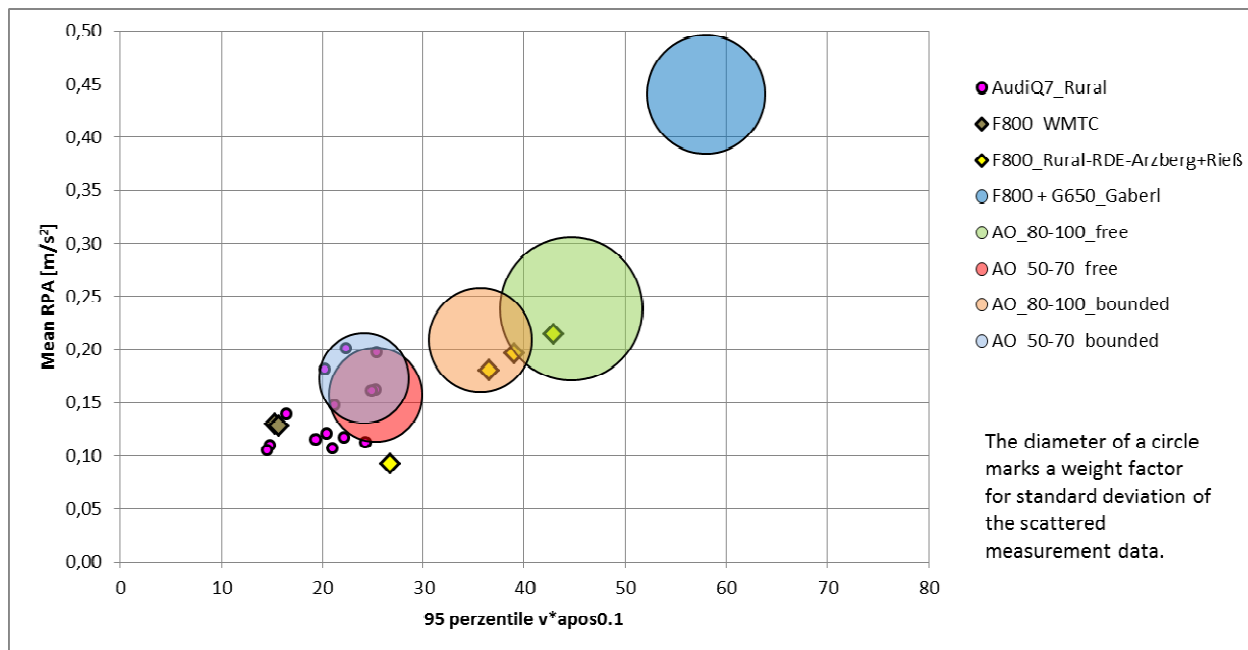
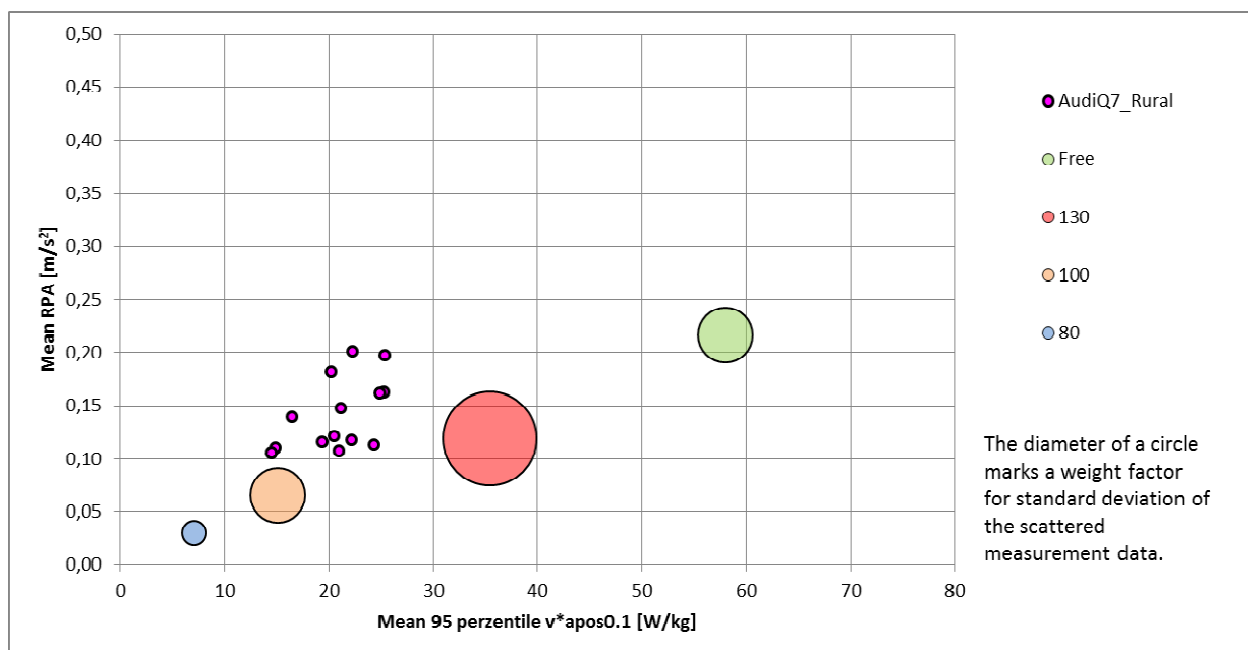


Abbildung 25: Dynamikparameter der Messungen für HBEFA im Stadtgebiet.



**Abbildung 26: Dynamikparameter der Messungen für HBEFA im Überland.**

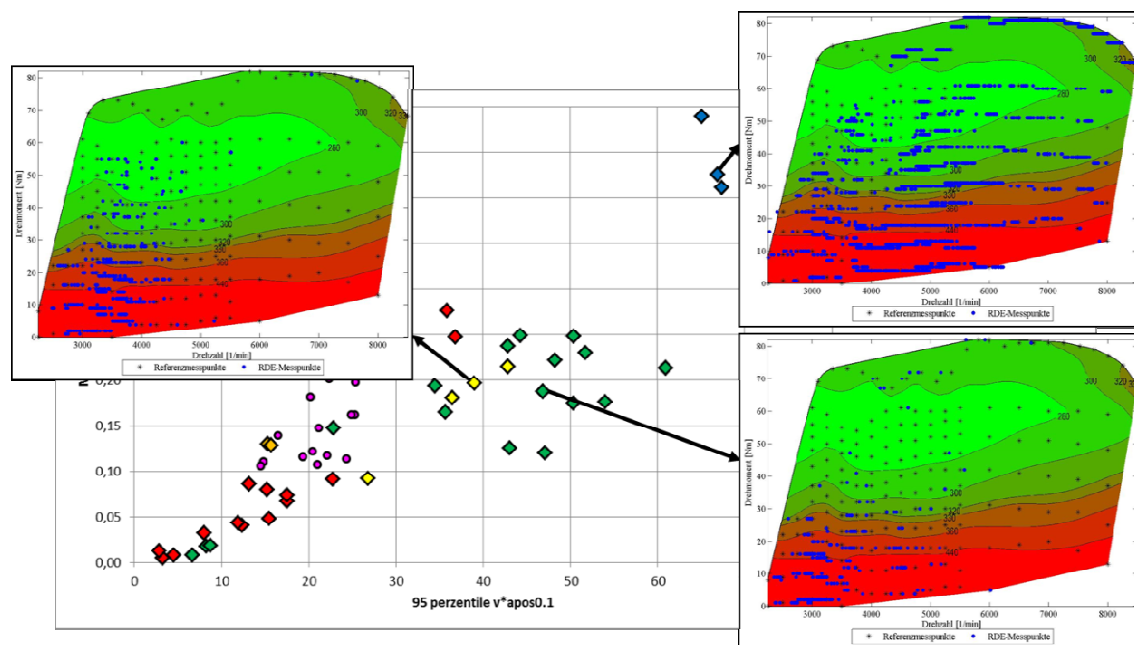


**Abbildung 27: Dynamikparameter der Messungen für HBEFA auf Autobahnen.**

In dieser Darstellungsform ist wiederum zu erkennen, dass Motorräder im Realbetrieb dynamischer gefahren werden als das für PKW üblich ist. Vor allem sticht in Abbildung 26 der blaue Kreis im rechten oberen Diagrammbereich hervor. Dieser repräsentiert das sportorientierte Straßensegment „Gaberl“, wie bereit weiter oben beschrieben.

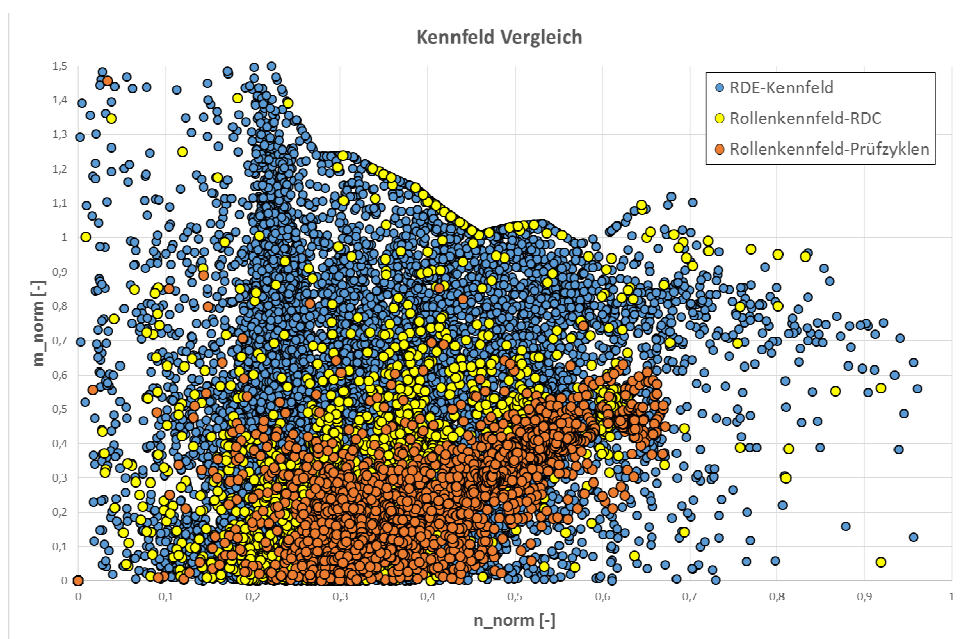
Für das Versuchsfahrzeug #1 wurden einige Fahrscenarien auf ihre Kennfeldabdeckung überprüft. Abbildung 28 zeigt die Verteilung der Lastpunkte im Motorkennfeld für drei verschiedene Fahrzyklen sowie die dazugehörige Auswertung der Fahrdynamikparameter für den Überlandbereich wie auch in Abbildung 26 dargestellt. Auf der linken Seite sowie rechts

das untere Motorkennfeld zeigt die Kennfeldabdeckung des Versuchsfahrzeuges für 2 unterschiedliche PKW-RDE-Streckenführungen. Es ist zu erkennen, dass bei beiden Strecken die Volllast nur sehr kurz genutzt wird. Außerdem werden die höheren Drehzahlen beinahe völlig ausgespart. Im Gegensatz dazu ist rechts oben die Lastpunktverteilung im selben Motorkennfeld für das Segment „Gaberl“ bei ambitionierter Fahrweise dargestellt. Hier wird sowohl der komplette Drehzahl als auch Lastbereich ausgenutzt.



**Abbildung 28: Ausgewählte Einzelmessungen von Überland-Segmenten und deren Darstellung im Motorkennfeld eines BMW F800 GT Motorrades.**

Im direkten Vergleich zu obiger Abbildung zeigt folgende Abbildung 29 die Kennfeldabdeckung des RDC Rollenzyklus (siehe dazu Abbildung 54). Es ist zu erkennen, dass die Abdeckung entsprechend dichter ist als bei den legislativen Typprüfzyklen.



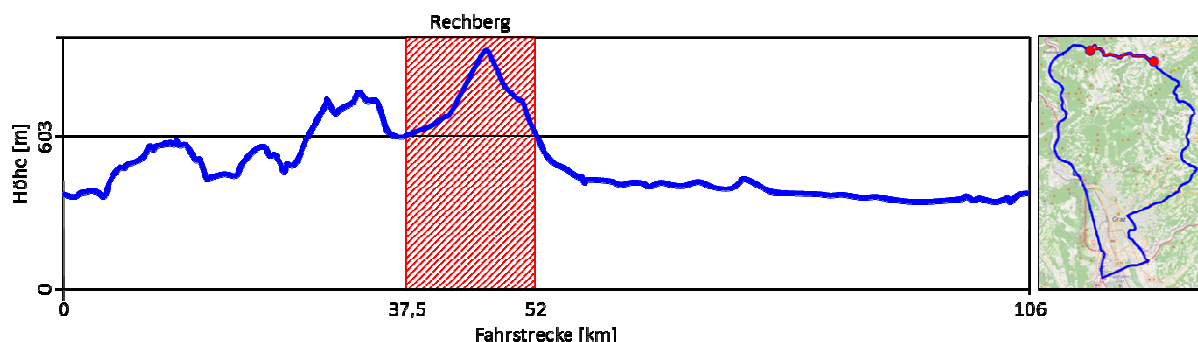
**Abbildung 29: Vergleich der Kennfeldabdeckung zwischen RDE Fahrten, RDC Rollenmessungen und legislativem Prüfzyklus aus der PHEM Simulation (siehe dazu Abbildung 54).**

Um vor allem die Fahrdynamik auf kurvigen und bergigen Straßensegmenten, die in der Freizeit von Motorradfahrern gerne befahren werden, darstellen zu können, wurde versucht, mit aus der PKW-RDE Gesetzgebung etablierten Dynamikfaktor Vergleiche in Zahlen anzustellen. Folgende Tabelle 9 zeigt dazu einen Vergleich des Faktors Mean 95 Perzentil von  $v_{vert} \cdot a_{pos}$  [ $m^2/s^3$ ] für unterschiedliche Straßensegmente.

**Tabelle 9: Vergleich eines speziellen Dynamikfaktors für sport-orientierte und bergige Straßensegmente.**

| Testzyklus              | $(v_{vert} \cdot a_{pos})_{95}$ [ $m^2/s^3$ ] |
|-------------------------|-----------------------------------------------|
| Gaberl                  | 5,463                                         |
| Arzberg                 | 2,380                                         |
| Arzberg (ohne Rechberg) | 1,384                                         |

Das Höhenprofil der RDE Teststrecke "Arzberg" mit dem bergigen Zwischensegment "Rechberg" ist in Abbildung 30 dargestellt. Oben angeführte Tabelle lässt erkennen, welche Werte sich an vertikaler Dynamik aus einer derartigen Strecke ergeben. Diese RDE Strecke wurde auf Basis (EC, 2016) entwickelt. Betrachtet man nun Motorradfahrer, die ihr Fahrzeug zu Freizeit Zwecken verwenden, so steht das im starken Gegensatz zu einem PKW Testzyklus, was sich auch in der resultierenden Fahrdynamik bei den Messungen des sport-orientierten Segmentes „Gaberl“ niederschlägt.



**Abbildung 30: Darstellung der Höhenprofils der RDE Strecke "Arzberg" mit markierten bergigen Straßensegment "Rechberg".**

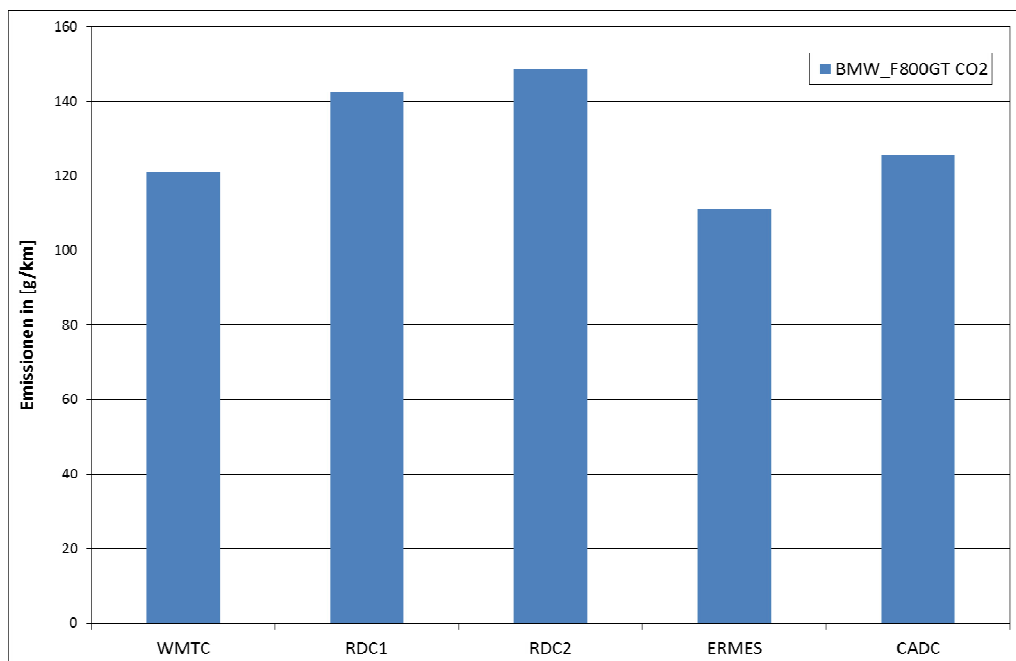
Aus den oben genannten Gründen wurde für die Entwicklung des Real World Zyklus RDC1 zusätzlich zu den ohnehin für Motorräder neu vermessenen Segmenten für Stadt-, Überland- und Autobahnanteil, auf ein Straßensegment mit konstanter positiver Steigung von etwa 7% zurückgegriffen. Dies ist bereits in Abbildung 16 dargestellt. Damit soll der zeitweiligen Verwendung von Zweirädern als Freizeitfahrzeug Rechnung getragen werden.

### 8.3. Ergebnisse der limitierten Emissionskomponenten

Die limitierten Emissionskomponenten (CO, NO<sub>x</sub>, HC) sowie CO<sub>2</sub> wurden mit allen Versuchsfahrzeugen für die jeweils relevanten Fahrzyklen aufgezeichnet und ausgewertet. Für den Vergleich der unterschiedlichen Zyklen wurden die Massenemissionen bezogen auf die gefahrene Strecke (g/km) der jeweiligen Komponente herangezogen. Anzumerken ist hier, dass für keinen Zyklus eine Gewichtung der Stadt-, Überland- und Autobahnanteile vorge-

nommen wurde. Das bedeutet, dass die aufsummierten Massenemissionen des gesamten Zyklus auf die Gesamtlänge des jeweiligen Zyklus bezogen wurden.

Abbildung 31 zeigt exemplarisch einen Vergleich der CO<sub>2</sub> Emissionen der BMW F800GT für alle mit diesem Motorrad gefahrenen Rollenzyklen. Die höchsten CO<sub>2</sub> Emissionen werden hier bei den beiden neuen Motorradzyklen RDC1 und RDC2 erreicht. Dahinter liegen der CADC sowie der WMTC, welche ähnliche CO<sub>2</sub> Emissionen ausweisen. Der geringste Wert wird beim ERMES Zyklus erreicht. Insgesamt weisen diese Messergebnisse eine Spreizung von ~25% zwischen dem höchsten und niedrigstem Wert auf.

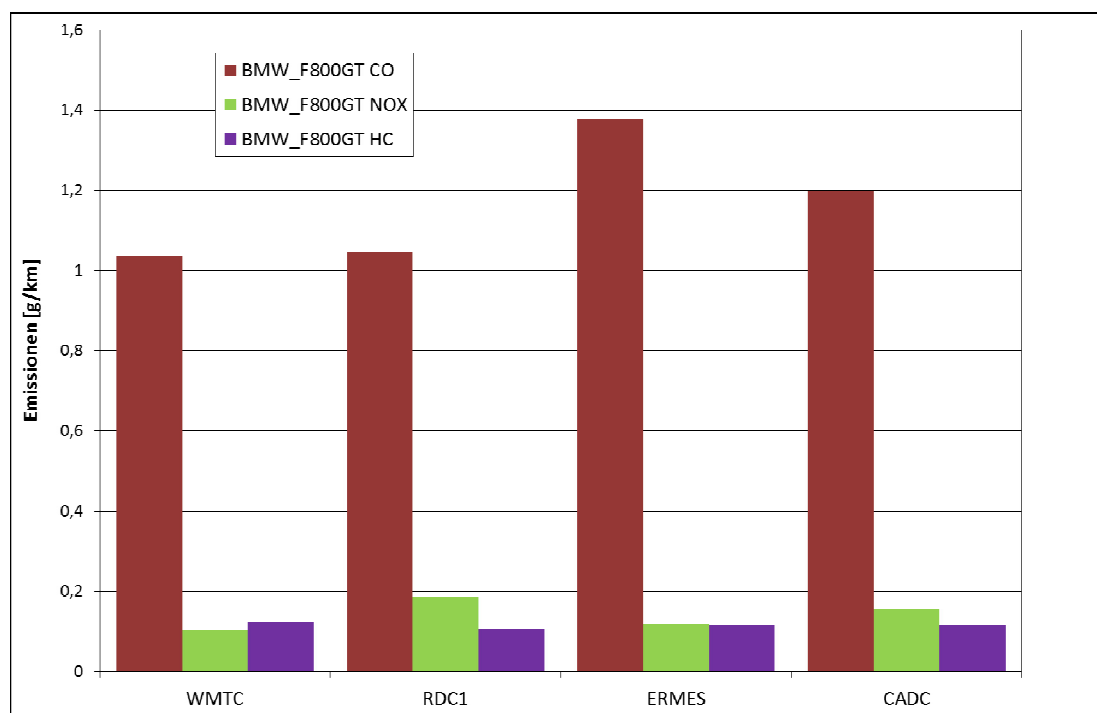


**Abbildung 31: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen der BMW-F800GT für verschiedene Rollenzyklen**

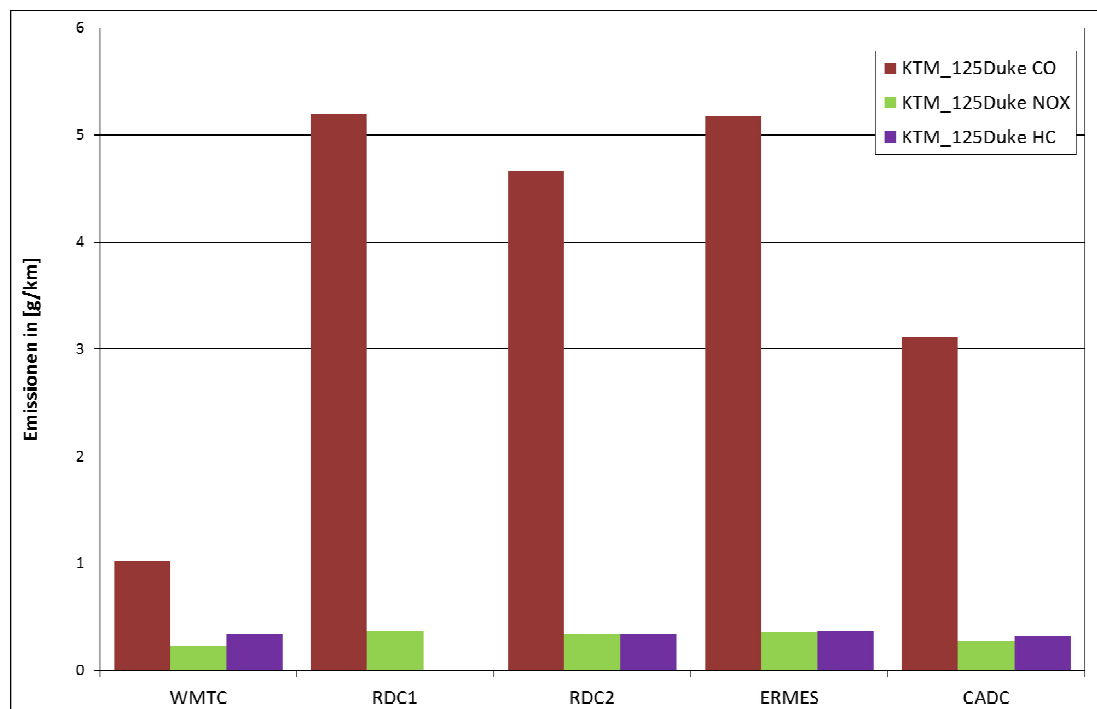
Abbildung 32 zeigt den Vergleich der limitierten Emissionen für die BMW F800GT für alle vorhandenen Zyklen. Im Gegensatz zum CO<sub>2</sub> Ergebnis zeigt sich bei den limitierten Emissionen, dass die beiden PKW Zyklen (ERMES, CADC) die höchsten Werte ergeben. Vor allem beim CO zeigen diese Zyklen deutlich höhere Werte. Die Messergebnisse für die HC Emissionen weisen deutlich geringere Unterschiede zwischen den Zyklen auf. Die geringsten Emissionen für CO und NO<sub>x</sub> ergeben sich für dieses Fahrzeug im WMTC. Dies kann auf den eingeschränkten Kennfeldbereich, der für diesen Zyklus verwendet wird, zurückgeführt werden. Trotz des deutlich größeren abgedeckten Kennfeldbereiches der drei RD-Zyklen (RDC1, ERMES & CADC) sind die Unterschiede in den Ergebnissen nicht sehr groß.

Der Vergleich der limitierten Emissionen der KTM 125-Duke für alle gemessenen Zyklen ist in Abbildung 33 dargestellt. Auffällig sind hier die deutlich höheren Emissionswerte in den RD-Zyklen für alle drei Komponenten im Vergleich zur BMW. Dies liegt hauptsächlich am relativ niedrigem Hubraum bzw. der niedrigen Leistung der KTM. Dadurch muss mit einem Motorrad dieser Klasse in den RD-Zyklen ein sehr viel größerer Anteil in der Vollast gefahren werden. Im Vergleich dazu sind die Emissionen im WMTC deutlich niedriger, was an der Tatsache liegt, dass hier kein Autobahnanteil gefahren werden muss. Lässt man im RDC1 Zyklus beispielsweise ebenfalls den Autobahnanteil weg verringern sich die emittierten CO Emissionen auf ca. 2g/km. Dies bedeutet allerdings noch immer eine beinahe Verdoppelung des CO Emissionsausstoßes. Einzig bei den HC Emissionen zeigt sich kein großer Unterschied zwischen allen 5 Zyklen. Dies deutet darauf hin, dass die, durch die RD-Zyklen erreichte, verbesserte Kennfeldabdeckung für Motorradklassen >500cc eine hohe Belastung

für die Klasse 125cc mit sich bringt. Neben den zuvor beschriebenen RDCs wurde an der BMW F800GT auch eine Variante 3 („RDC3“) getestet, die einige Vollllastrampen beinhaltet. Diese Version erwies sich zumindest bei der BMW als nicht hilfreich in der Simulation und wurde nicht weiterverfolgt.



**Abbildung 32: Vergleich der limitierten Emissionen der BMW F800GT für verschiedene Zyklen**



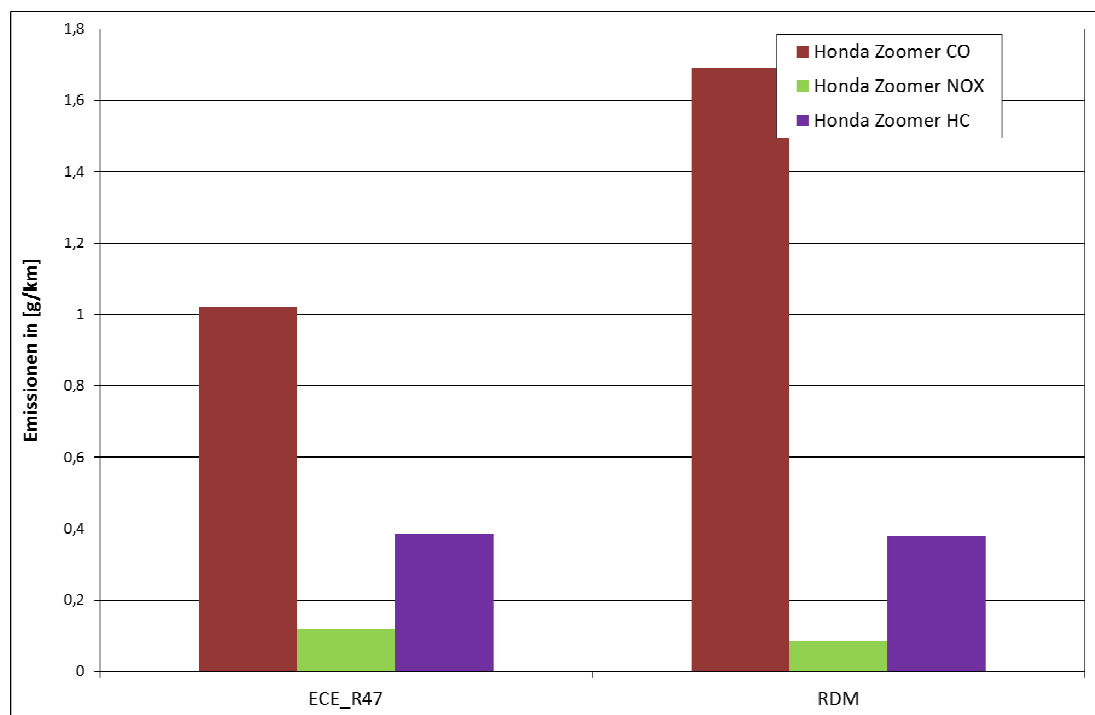
**Abbildung 33: Vergleich der limitierten Emissionen der KTM 125-Duke für verschiedene Zyklen**

Die beiden Versuchsfahrzeuge der Klasse 50cc wurden nur in 2 unterschiedlichen Fahrzyklen getestet. Zum einen der gesetzlich vorgeschriebene Homologierungszyklus ECE-R47 und der für Mopeds erstellte RD-Zyklus. Anzumerken ist hier, dass bei der Auswertung der



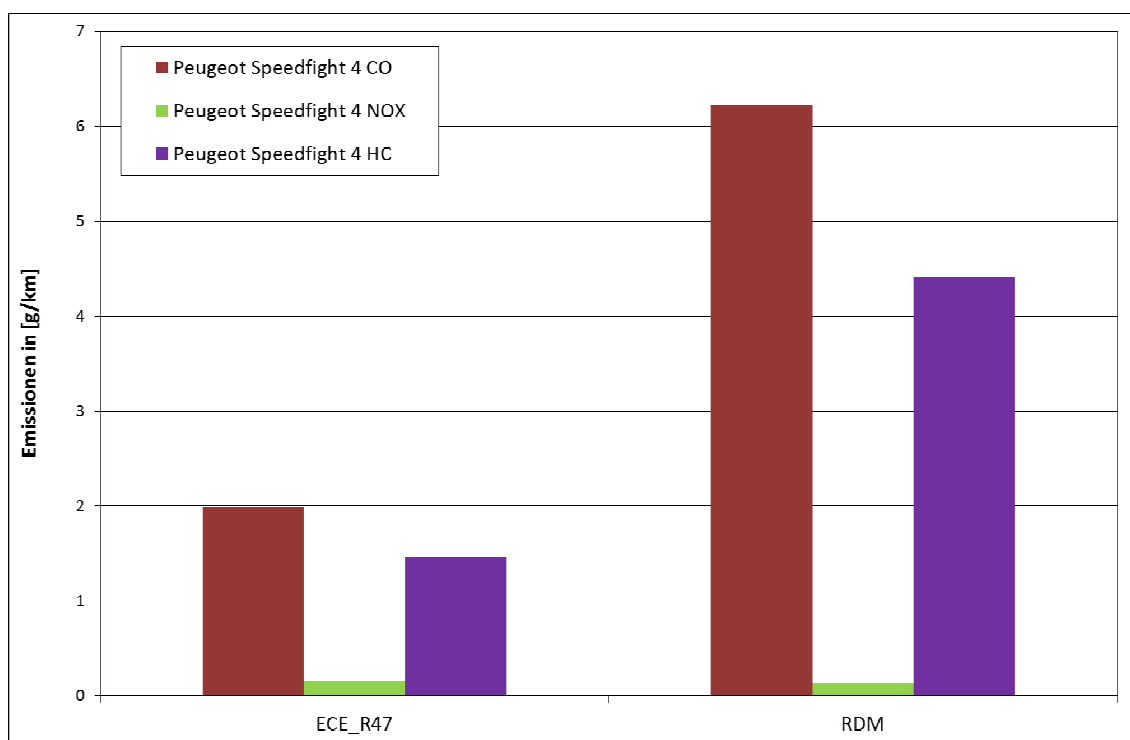
Emissionen keine Gewichtung der verschiedenen Anteile erfolgte. Das heißt im Fall des ECE-R47, dass nicht wie in der Homologierungsvorschrift für EURO2 geregelt nur die zweite Hälfte des Zyklus ausgewertet wurde. Es wurden alle Emissionen, inkl. Kaltstart, aufsummiert und auf die zurückgelegte Strecke bezogen. Dies erklärt auch die hohen Werte im Vergleich zu den gesetzlichen Grenzwerten.

Abbildung 34 zeigt den Vergleich der limitierten Emissionen für das 4-Takt Mofa Honda Zoomer aus beiden gefahrenen Zyklen. Es zeigt sich, dass vor allem die CO Emissionen im RDM Zyklus deutlich höher sind als im ECE-R47. Dagegen unterscheiden sich die HC Emissionen der beiden Zyklen kaum. Die NO<sub>x</sub> Emissionen sind im RD-Zyklus deutlich niedriger.



**Abbildung 34: Vergleich der limitierten Emissionen der Honda Zoomer für verschiedene Zyklen**

In Abbildung 35 ist der Vergleich der limitierten Emissionen für den 2-Takt Roller Peugeot Speedfight dargestellt. Der Peugeot zeigt für CO und NO<sub>x</sub> grundsätzlich die gleichen Trends wie der Honda. Es können im RDM Zyklus wieder deutlich erhöhte CO Emissionen sowie leicht reduzierte NO<sub>x</sub> Emissionen festgestellt werden. Die Gründe für die deutlichen Unterschiede in den Emissionswerten sind wie beim Honda vermutlich höhere Volllastanteile im RDM. Das Verhalten bei den HC Emissionen unterscheidet sich allerdings deutlich zum 4-Takt Honda Roller. Für den RDM-Zyklus wurden stark überhöhte HC-Emissionen gemessen. Zusätzlich sind sowohl die Absolutwerte des Peugeot bei beiden Zyklen deutlich höher als auch die prozentuelle Steigerung der CO und HC Werte vom ECE-R47 zum RDM. Die erhöhten Emissionswerte als auch die Sensibilität hinsichtlich Zyklus resultieren höchstwahrscheinlich aus dem 2-Takt Prinzip des Peugeot.



**Abbildung 35: Vergleich der limitierten Emissionen des Peugeot Speedfight für verschiedene Zyklen**

#### 8.4. Nicht limitierte gesundheits- und klimarelevante Emissionskomponenten

Bei allen Messungen am Rollenprüfstand wurde als zusätzliches Messgerät zum Abgleich der Emissionen sowie zur Messung nicht limitierter Emissionskomponenten eine FTIR Analyse der Firma IAG verwendet. Mit diesem Gerät können eine Vielzahl an Emissionskomponenten gemessen werden, wodurch es nötig wird, diese in Hinblick auf die Wichtigkeit deren Erfassung zu bewerten. Diese Bewertung wurde mit Hilfe der in Tabelle 10 dargestellten Kriterien durchgeführt.

Zum einen wurde aus zwei Kriterien eine Kennzahl für die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt gebildet. Zum anderen wurde mittels Analyse der Messwerte, für die in Messkampagne MK4 ermittelten Werte, eine Kennzahl für die Konzentrationen bei den verwendeten Versuchsfahrzeugen festgelegt. Diese beiden Kennzahlen ergeben zusammen eine Gesamtbewertung, auf Basis dessen die relevanten nichtlimitierten Emissionskomponenten festgelegt wurden.

**Tabelle 10: Bewertungskriterien und Bewertung der Wichtigkeit der messtechnischen Erfassung von nichtlimitierten Emissionskomponenten am Rollenprüfstand.**

|                                                   | Gewichtung | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Acetylen) | CH <sub>4</sub> (Methan) | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (Ethan) | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (Benzol) | CH <sub>3</sub> OH (MeOH - Methanol) | NH <sub>3</sub> (Ammoniak) |
|---------------------------------------------------|------------|------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Auswirkung auf Klima                              | 0,5        | 0                                        | 4                        | 0                                     | 0                                      | 0                                    | 0                          |
| schädliche Wirkung auf Mensch und Umwelt          | 0,5        | 1                                        | 1                        | 1                                     | 4                                      | 2                                    | 3                          |
| <b>Kennzahl Umweltbelastung</b>                   |            | <b>0,5</b>                               | <b>2,5</b>               | <b>0,5</b>                            | <b>2</b>                               | <b>1</b>                             | <b>1,5</b>                 |
| Mittelwert der Konzentration                      | 0,25       | 2                                        | 4                        | 1                                     | 2                                      | 1                                    | 3                          |
| zeitlicher Verlauf der Konzentration              | 0,25       | 0                                        | 3                        | 1                                     | 1                                      | 0                                    | 1                          |
| Bewertung der Summenemissionen für die Testzyklen | 0,5        | 1                                        | 3                        | 2                                     | 4                                      | 1                                    | 3                          |
| <b>Kennzahl Konzentration</b>                     |            | <b>1</b>                                 | <b>3,25</b>              | <b>1,5</b>                            | <b>2,75</b>                            | <b>0,75</b>                          | <b>2,5</b>                 |
| <b>Gesamtbewertung</b>                            |            | <b>0,75</b>                              | <b>2,875</b>             | <b>1</b>                              | <b>2,375</b>                           | <b>0,875</b>                         | <b>2</b>                   |

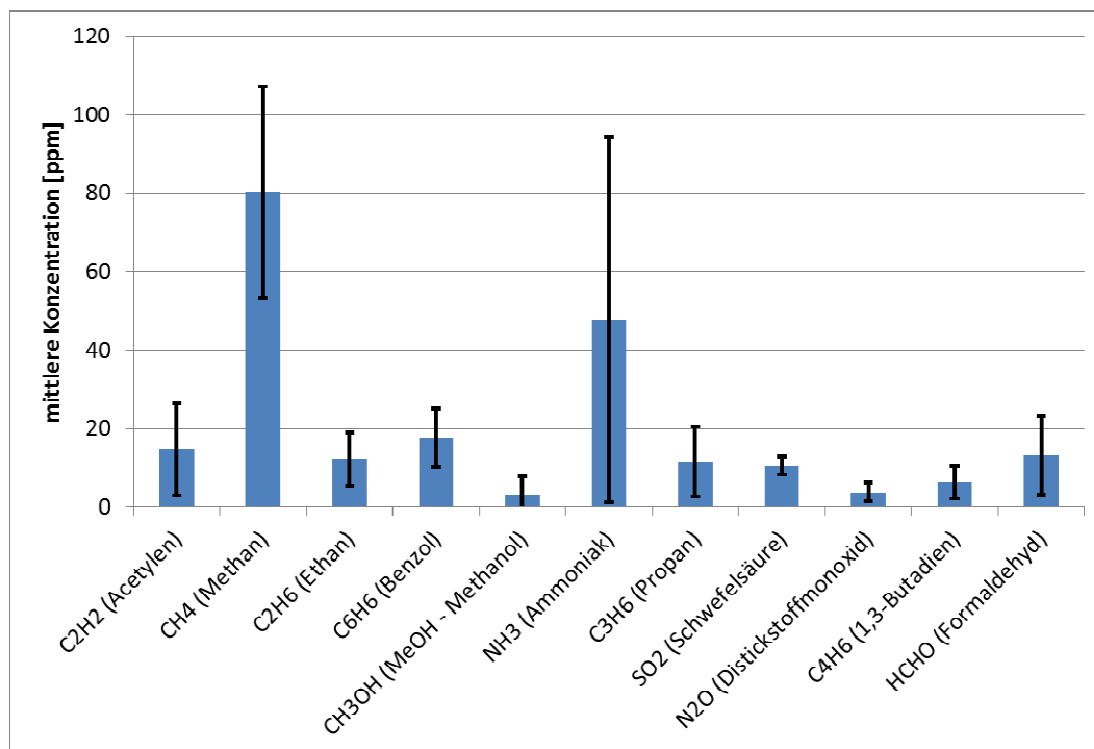
|                                                   | Gewichtung | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (Propan) | SO <sub>2</sub> (Schwefeldioxid) | N <sub>2</sub> O (Distickstoffmonoxid) | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> (1,3-Butadien) | HCHO (Formaldehyd) |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------|
| Auswirkung auf Klima                              | 0,5        | 0                                      | 0                                | 4                                      | 0                                            | 0                  |
| schädliche Wirkung auf Mensch und Umwelt          | 0,5        | 1                                      | 4                                | 1                                      | 4                                            | 4                  |
| <b>Kennzahl Umweltbelastung</b>                   |            | <b>0,5</b>                             | <b>2</b>                         | <b>2,5</b>                             | <b>2</b>                                     | <b>2</b>           |
| Mittelwert der Konzentration                      | 0,25       | 1                                      | 1                                | 0                                      | 0                                            | 1                  |
| zeitlicher Verlauf der Konzentration              | 0,25       | 0                                      | 2                                | 2                                      | 0                                            | 1                  |
| Bewertung der Summenemissionen für die Testzyklen | 0,5        | 2                                      | 1                                | 1                                      | 1                                            | 1                  |
| <b>Kennzahl Konzentration</b>                     |            | <b>1,25</b>                            | <b>1,25</b>                      | <b>1</b>                               | <b>0,5</b>                                   | <b>1</b>           |
| <b>Gesamtbewertung</b>                            |            | <b>0,875</b>                           | <b>1,625</b>                     | <b>1,75</b>                            | <b>1,25</b>                                  | <b>1,5</b>         |

Die Bewertung der schädlichen Wirkung auf Mensch und Umwelt wurde mit den Ziffern 0 bis 4 durchgeführt. Dabei bedeutet die Ziffer 0, dass von der Komponente keine Gefahr ausgeht und die Ziffer 4, dass es sich um eine stark toxische Substanz für Mensch und Umwelt handelt. Die relative Bewertung der Substanzen untereinander erfolgte unter anderem mittels MAK- Wert (maximale Arbeitsplatz Konzentration), GHS- Gefahrensymbole (Globally Harmonized System) oder anderer Attribute wie zum Beispiel krebserregend oder ätzend. Folgende Tabelle 11 fasst die Bewertung der schädlichen Wirkung auf Mensch und Umwelt von ausgewählten Messkomponenten des FTIR zusammen.

**Tabelle 11: Bewertung der schädlichen Wirkung auf Mensch und Umwelt ausgewählter Messkomponenten des FTIR.**

| Komponente                                       | Bewertung | Eigenschaften                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (Acetylen)</b>     | 1         | ungiftig, betäubende Wirkung                                                                                                                                                        |
| <b>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> (Benzol)</b>       | 4         | krebserregend und giftig; Schädigung des zentralen Nervensystems und Schädigung des blutbildenden Systems bei chronischer Toxizität                                                 |
| <b>HCHO (Formaldehyd)</b>                        | 4         | krebserregend; Allergien, Haut-, Atemwegs- oder Augenreizungen; MAK- Wert: 0,37 [mg/m <sup>3</sup> ];                                                                               |
| <b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (Ethan)</b>        | 1         | schwache betäubende Wirkung                                                                                                                                                         |
| <b>CH<sub>3</sub>OH (MeOH – Methanol)</b>        | 2         | Schädigung des zentralen Nervensystems, jedoch Gefährdung durch Aufnahme über Atemwege geringer; MAK- Wert 270 [mg/m <sup>3</sup> ];                                                |
| <b>SO<sub>2</sub> (Schwefeldioxid)</b>           | 4         | stark toxisch; bereits bei geringen Konzentrationen Vergiftungserscheinungen; Umweltschädigung durch sauren Regen; beteiligt an Smog- Bildung; MAK- Wert: 2,7 [mg/m <sup>3</sup> ]; |
| <b>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> (Propan)</b>       | 1         | ungiftig, in hoher Dosierung leicht betäubend; MAK- Wert: 1800 [mg/m <sup>3</sup> ]                                                                                                 |
| <b>CH<sub>4</sub> (Methan)</b>                   | 1         | ungiftig, in hoher Dosierung leicht betäubend                                                                                                                                       |
| <b>NH<sub>3</sub> (Ammoniak)</b>                 | 3         | NH <sub>3</sub> - Dämpfe reizend bzw. ätzend; MAK- Wert: 14 [mg/m <sup>3</sup> ]                                                                                                    |
| <b>N<sub>2</sub>O (Distickstoffmonoxid)</b>      | 1         | in großer Dosierung betäubend/ Erstickungsgefahr; MAK- Wert 180 [mg/m <sup>3</sup> ], starke Treibhausgaswirkung                                                                    |
| <b>C<sub>4</sub>H<sub>5</sub> (1,3-Butadien)</b> | 4         | krebserregend und giftig; TRK- (Technische Richtkonzentration) Wert: 11 [mg/m <sup>3</sup> ]; Gefahrensymbol: Gesundheitsgefährdend                                                 |

Um die vom FTIR gemessene Konzentration der Emissionen zueinander zu vergleichen, wurde der Mittelwert der jeweiligen Konzentration über die gemessenen Zyklen WMTC, RDC1, ERMES, CADC und RDM gebildet. Diese wurden einer Bewertung zwischen 0 und 4, je nach mittlerer auftretender Höhe der Konzentrationen unterzogen, wie in Abbildung 36 dargestellt. Da sich darin vor allem für den vermessenen Mofa Peugeot Speedfight, dessen Motor nach dem Zweitaktprinzip arbeitet, erhebliche Unterschiede ergeben, wurde dieses Fahrzeug separat in die Wertung miteinbezogen.



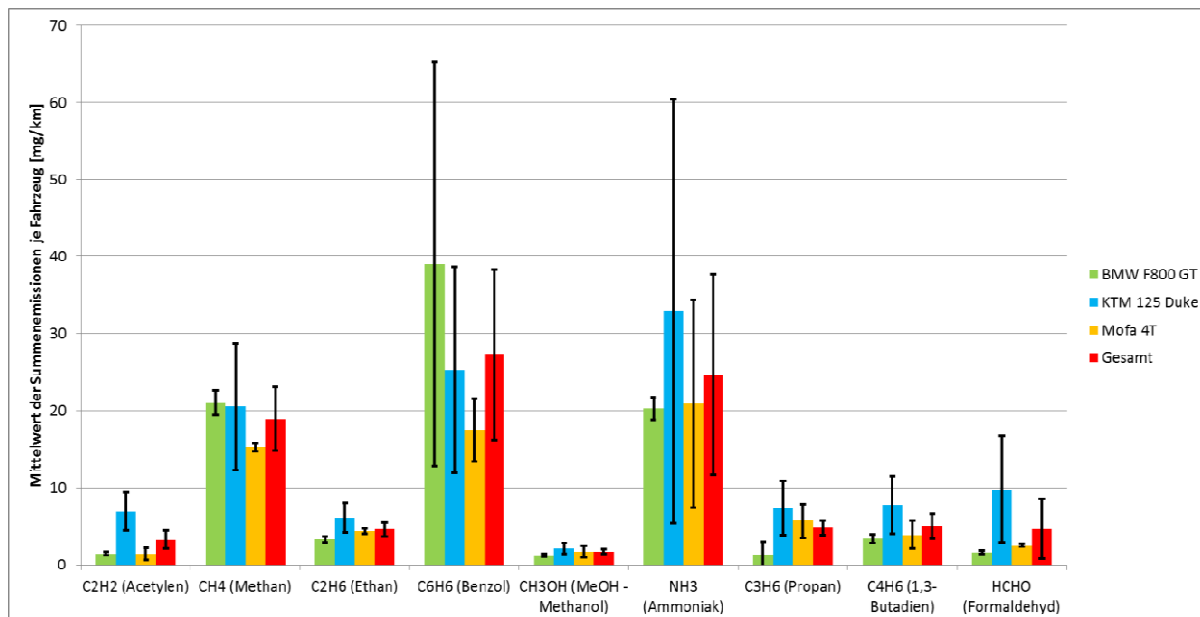
**Abbildung 36: Mittlere Konzentrationen ausgewählter nicht limitierter Emissionskomponenten aus den Messungen der 3 Zweiräder mit 4-Taktmotor und deren Standardabweichung.**

Auch wurde in der Bewertungstabelle der zeitliche Verlauf der gemessenen Emissionen mit den Ziffern 0 bis 4 bewertet. Dabei besagt der Wert 0, dass sich die Konzentrationen nicht mit dem Lastpunkt ändern, sondern um die Nulllage schwanken (Rauschen). Eine Bewertung mit dem Wert 4 bedeutet, dass der zeitliche Verlauf der Konzentration vom Lastpunkt abhängt und dem zeitlichen CO<sub>2</sub>-Verlauf ähnelt. Die Werte zwischen 0 und 4 dienen zur Abstufung.

Zusätzlich dazu wurden die Summenemissionen der einzelnen Testzyklen bezogen auf die zurückgelegte Strecke ausgewertet. Entsprechend den Mittelwerten über die ausgewerteten Testzyklen wurden wiederum die Werte zwischen 0 und 4 festgelegt.

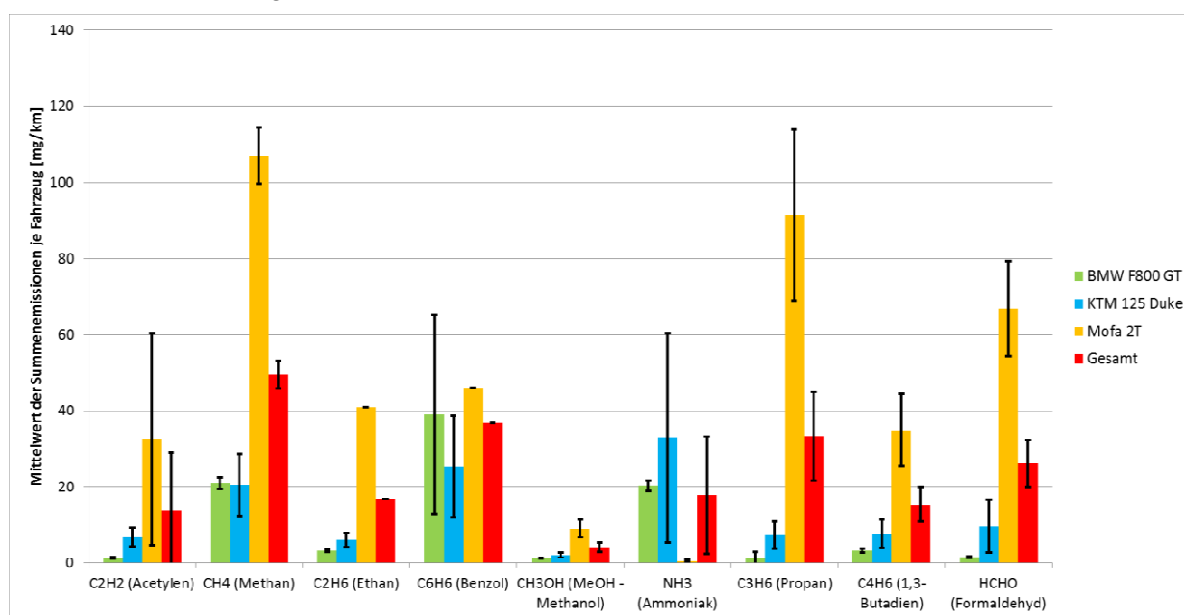
Entsprechend oben dargestellter Tabelle 10 werden die Messwerte von NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> und C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> als relevante nicht limitierte Emissionen eingestuft. Dementsprechend sind in folgender Abbildung 37 die Mittelwerte der summierten Emissionen über alle Testzyklen je Fahrzeug mit deren Standardabweichung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die angegebenen Werte teilweise in ihrer Varianz stark streuen, was unter anderem auf die geringe Stichprobenanzahl zurückzuführen ist. Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass die Mittelwerte im Rahmen üblicher Erfahrungswerte sind. So wird vergleichsweise für Benzol für benzinbetriebenen EU4 PKWs als Mittelwert über Artemis Testzyklen ein Wertebereich von 0,5 bis 60 [mg/km] gemessen<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Cedric Louis et al.: *PAH, BTEX, carbonyl compound, black-carbon, NO<sub>2</sub> and ultrafine particle dynamometer bench emissions for Euro 4 and Euro 5 diesel and gasoline passenger cars*, Atmospheric Environment, Elsevier, 2016



**Abbildung 37: Mittelwerte der summierten Emissionen über alle Testzyklen je Fahrzeug für die drei 4-Takt betriebenen Zweiräder.**

Abbildung 38 zeigt die gleiche Darstellung der Mittelwerte der summierten Emissionen über alle gemessenen Testzyklen für das 2-Takt betriebene Mofa Peugeot Speedfight 3. Es sind die deutlich höheren Kohlenwasserstoff Emissionen gegenüber den nach dem 4-Takt Prinzip betriebenen Fahrzeugen zu erkennen.



**Abbildung 38: Mittelwerte der summierten Emissionen über alle Testzyklen je Fahrzeug mit dem 2-Takt Mofa Peugeot Speedfight 3.**

Bezüglich der gesundheitsschädigenden Wirkung dieser Abgaskomponenten wurde bereits Tabelle 11 angeführt, wobei zwischen Emissions- und Immissionswerten klar unterschieden werden muss. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass Ammoniak und Benzol keinen direkten Treibhauseffekt ( $GWP = 0$ ) sowie kein direktes Ozonabbaupotenzial ( $ODP = 0$ ) haben, je-

doch umso mehr gesundheitsschädigend sind als Methan. Zur Beurteilung der Bedeutung der nicht limitierten Emissionen als Treibhausgase können CO<sub>2</sub> Äquivalente gemäß Kyoto-Protokoll herangezogen werden. Damit ergibt sich bei den Emissionen der gemessenen 2-Räder für CH<sub>4</sub> im Mittel ein Äquivalent von etwa 1% der CO<sub>2</sub> Emissionen.

Andere nicht limitierte Emissionskomponenten wurden in dieser Analyse außen vorgelassen, was nicht heißen soll, dass diese bei anderen Fahrzeugen und Motorkonzepten nicht in relevanten Mengen auftreten. Beispielsweise besitzt Distickstoffmonoxid N<sub>2</sub>O ein sehr hohes CO<sub>2</sub> Äquivalent von GWP = 310 laut Kyoto-Protokoll und ist damit je emittierter Masse um ein vielfaches klimaschädlicher als CH<sub>4</sub>.

Des Weiteren wurden die nicht limitierten Emissionskomponenten der vermessenen Testzyklen relativ zum dynamischen Fahrverhalten untersucht. Dazu sind in Abbildung 39 und Abbildung 40 beispielhaft die Emissionen in [g/h] über dem Dynamikparameter  $v^*a_{pos}$  [W/kg] für ein BMW F800 GT und ein KTM 125 Duke Motorrad dargestellt.

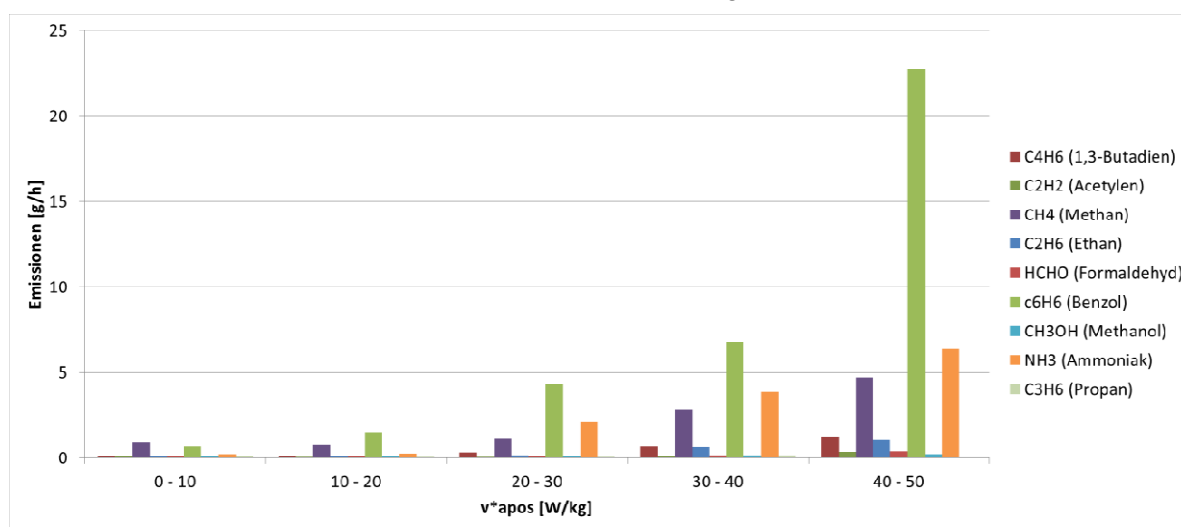


Abbildung 39: Emissionen über dem Dynamikparameter  $v^*a_{pos}$  im Mittel über alle am Prüfstand vermessenen Testzyklen mit einem BMW F800 GT Motorrad.

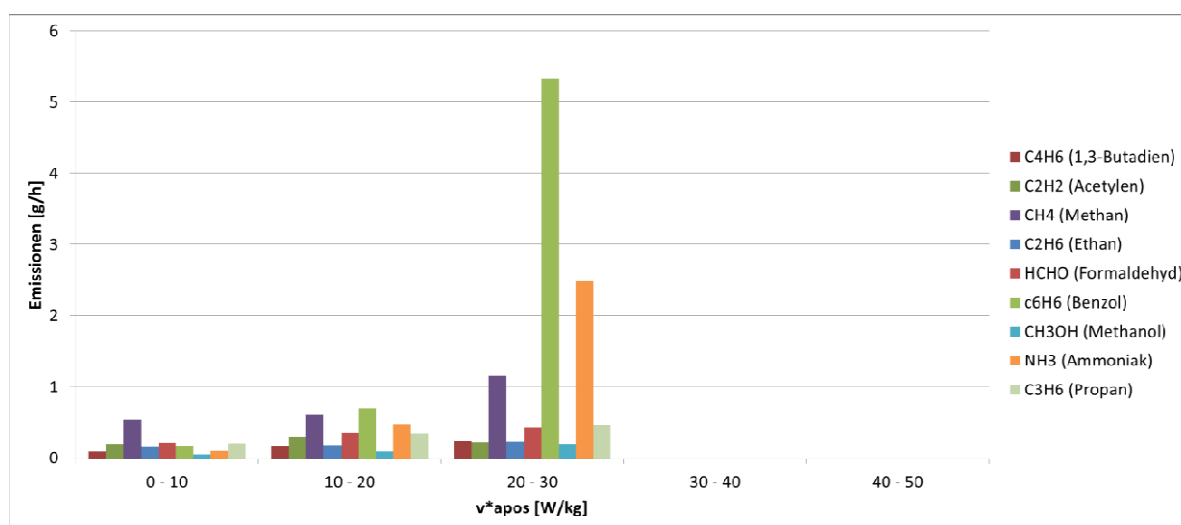


Abbildung 40: Emissionen über dem Dynamikparameter  $v^*a_{pos}$  im Mittel über alle am Prüfstand vermessenen Testzyklen mit einem KTM 125 Duke Motorrad.

In den beiden Grafiken ist ein deutlicher Anstieg der Emissionen mit Zunahme der Fahrdynamik zu erkennen. Zusätzlich kann wiederum die Relevanz der bereits oben diskutierten drei Emissionskomponenten  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  und  $\text{C}_6\text{H}_6$  gegenüber den übrigen herausgelesen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei den hier näher untersuchten nicht limitierten Emissionen,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  und  $\text{C}_6\text{H}_6$ , für die untersuchten Fahrzeuge und Testzyklen relevante Konzentrationen nachgewiesen werden konnten. Zusätzlich kann festgehalten werden, dass auch andere nicht limitierte Emissionen, wie beispielsweise Distickstoffmonoxid  $\text{N}_2\text{O}$ , schon in geringsten Mengen gesundheits- und klimarelevante Auswirkungen haben können und folglich auch in kommenden Messkampagnen zusätzlich gemessen werden sollten, insofern die Möglichkeit der Messung von nichtlimitierten Schadstoffen ohnedies gegeben ist, wenn ein FTIR eingesetzt wird.

## 9. Simulation und Softwareerstellung

Ziel dieses Arbeitspaketes (*AP4: Simulation und Softwareerstellung*) ist es, das Simulationsmodell PHEM (Kap. 9.1) für die Verarbeitung von Zweirad-Emissionsdaten anzupassen und die damit erzeugte Simulationemethode an den vier gemessenen Zweirädern auf Genauigkeit und Anwendbarkeit zu testen, PHEM sollte somit in der Lage sein, bestehende und zukünftige Emissionsmessdaten von 2-Rädern zu verarbeiten und Emissionsfaktoren für diese Kfz-Kategorien für alle HBEFA Verkehrszustände zu berechnen.

Spezielle Fragen waren:

- Sind Rollen- und On-Board Testdaten gleichermaßen als Modelleingabedaten geeignet?
- Können die realen Fahrwiderstände von Zweirädern aus PEMS Messdaten generiert werden?
- Kann ein einfaches Auspuff-Emissionskennfeld verwendet werden oder muss die Abgasnachbehandlung im Detail simuliert werden?
- Kann das Schaltmodell von PKW als Basis für Schaltmanöver von 2-Rädern genutzt werden oder muss ein alternativer Ansatz entwickelt werden?
- Wie sollen nicht limitierte Abgaskomponenten behandelt werden?

Die „optimale“ Methode wird damit anhand der erreichbaren Genauigkeit und des Aufwands zur Bereitstellung der notwendigen Daten aus zukünftigen Messprogrammen vorgeschlagen. Die erforderlichen Anpassungen der Software PHEM wurden implementiert.

### 9.1. Das Simulationsmodell PHEM

PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) wird am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) der TU Graz entwickelt. Seit 1999 wird das Modell in nationalen und internationalen Projekten weiterentwickelt um neue Technologien abzubilden und die Anwenderfreundlichkeit sowie Genauigkeit zu verbessern. Weitere Detailinformationen können z.B. in (Luz, 2013), (Hausberger, 2012), (Hausberger, 2011), (Zallinger, 2010), (Rexeis, 2009), (Hausberger, 2003) gefunden werden.



### 9.1.1. Einsatzgebiete

PHEM ist eine Software zur Simulation von Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge, Schwerlastfahrzeuge und nunmehr auch für 2-Räder anhand von Fahrzeuggeschwindigkeitszyklen (Geschwindigkeit und Fahrbahnneigung über Zeit). Die Ergebnisse sind die Emissionen aller im Motorkennfeld abgelegten Emissionskomponenten sekundlich und als Zyklusmittelwerte.

Eine Schnittstelle mit mikroskopischen Verkehrsmodellen und mit Luftqualitätsmodellen steht zur Verfügung, wodurch eine direkte Verlinkung ermöglicht wird. Zusätzlich liegen für PKW, LNF und SNF für alle EURO-Emissionsklassen generische Eingangsdaten für durchschnittliche europäische Fahrzeugklassen vor. PHEM wird auch für die Berechnung der Emissionsfaktoren für alle Verkehrssituationen des HBEFA genutzt ([www.hbefa.net](http://www.hbefa.net)) und kann beliebige Abgaskomponenten je nach vorhandenen Eingangsdaten simulieren. Standard-Datensätze decken den Kraftstofffluss, CO<sub>2</sub>, CO, THC, NO, NO<sub>2</sub>, PM und PN ab.

### 9.1.2. Kurzbeschreibung

PHEM ist ein Emissionsmodell, welches den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen von Straßenfahrzeugen in 1Hz, für einen bestimmten Fahrzyklus, auf der Grundlage der Fahrzeuglängsdynamik und Emissionskennfeldern (

Abbildung 41) simuliert. Der Motorleistungsbedarf wird dabei in 1Hz, für den Zyklus, aus den Fahrwiderständen und Verlusten im Antriebsstrang berechnet. Die Motordrehzahl wird durch den Reifendurchmesser, den Achsantrieb und das Übersetzungsverhältnis sowie ein Schaltmodell bestimmt. Abgasemissionen und Kraftstoffverbrauch werden dann aus Motorkennfeldern interpoliert. Um die Genauigkeit der simulierten Emissionen zu erhöhen, können Korrekturfunktionen angewendet werden, um ein unterschiedliches Emissionsverhalten bei transienten Motorlasten zu berücksichtigen. Des Weiteren verfügt PHEM über Modelle zur Berücksichtigung der Effizienz von Abgasnachbehandlungssystemen. Die Temperaturen der katalytischen Wandler werden durch eine 0-dimensionale Wärmebilanz und aus der Wärmeübertragung zwischen Abgas und dem Katalysatormaterial und von der Abgasleitung zur Umgebung simuliert. Diese Routine ist besonders wichtig bei der Simulation von SCR-Systemen (Abkühlen bei niedrigen Motorlasten) und bei der Simulation von Kaltstart-Effekten. Das Abgasnachbehandlungs-Modell von PHEM ist in (Rexeis, 2009) beschrieben. Zusätzlich ist ein Fahrermodell implementiert, um repräsentative Gangschaltmanöver zu liefern. Modelle für Standard-Testverfahren (NEDS, WLTP, etc.) sowie für reales Fahrverhalten von PKW, LNF und SNF sind in PHEM enthalten.

Da das Fahrzeuglängsdynamikmodell die Motorleistung und die Geschwindigkeit aus physikalischen Zusammenhängen berechnet, kann jeder erdenkliche Fahrzustand durch diesen Ansatz berechnet werden. Die Simulation unterschiedlicher Nutzlasten von Fahrzeugen in Verbindung mit Straßenlängsgradienten und variablen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen lässt sich somit durch das Modell genau wie die Auswirkungen des unterschiedlichen Schaltverhaltens des Fahrers berechnen. In der Fahrzeugentwicklung kann das Modell verschiedene Kombinationen von Motor, Antriebsstrang und Fahrzeug, einschließlich Hybridantrieb simulieren.

Zur Simulation von Emissionsfaktoren bietet PHEM einen vordefinierten Satz von "durchschnittlichen Fahrzeugen" für alle relevanten Fahrzeugschichten bei PKW, LNF und SNF. Diese durchschnittlichen Kfz werden aus europaweit gesammelten Messdaten in realen Fahrzyklen von PHEM generiert. Dabei werden mittlere Motorkennfelder und Fahrzeugdaten je Fahrzeugschicht (z.B. PKW Diesel EURO 6) erzeugt.

Eine erweiterte Modellanwendung ermöglicht den Aufbau von neuen Fahrzeugen, z.B. als Werkzeug für die Fahrzeugentwicklung und für Konzeptvergleiche.

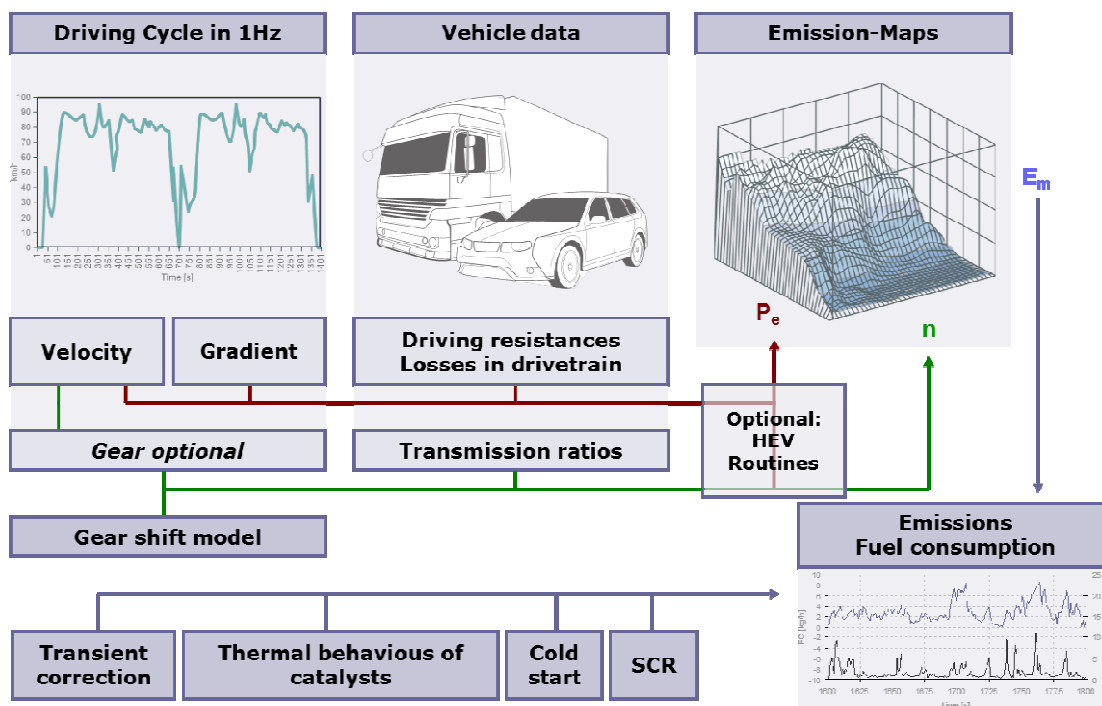


Abbildung 41: Schema des PHEM Modells

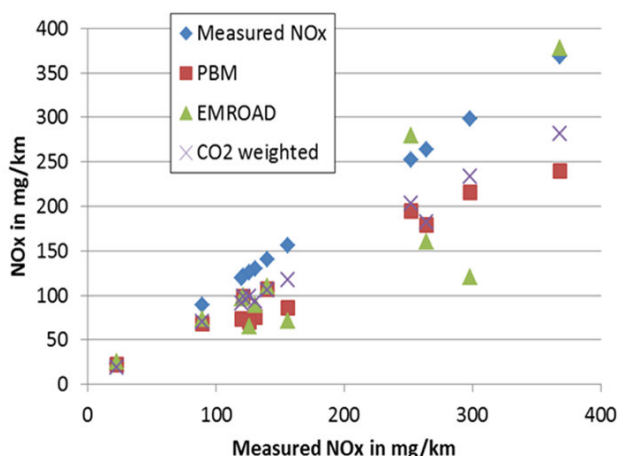
Die Schnittstelle zu mikroskalaren Verkehrsmodellen als alternative Quelle für die Bereitstellung von Fahrzeuggeschwindigkeitsmustern, ermöglicht eine rein simulationsbasierte Analyse und Optimierung von Verkehrssystemen, zur Minimierung von Emissionen und Energieverbrauch. Die standardisierten Ausgabedateien beinhalten auch die gesamten Emissionsmengen, die den einzelnen Segmenten des Straßennetzes zugeordnet sind, wodurch Luftqualitätsmodelle direkt beliefert werden können.

Seit Juni 2016 bietet PHEM auch eine Routine zur Umwandlung von PEMS-Testdaten in Motorenemissionskennfelder (Auspuff oder Motorausgang) durch einen neuartigen Ansatz, der die tatsächliche Motorleistung aus  $\text{CO}_2$ - und Motordrehzahlaufzeichnungen berechnet. Neben Motor- und Rollentests können somit auch alle PEMS-Prüfungen für die Modellentwicklung verwendet werden, solange Emissionen und Motordrehzahlen erfasst werden und der Fahrzyklus die entsprechenden Motorlastbereiche abdeckt.

### 9.1.3. $\text{CO}_2$ Leistungsinterpolation

Die Verwendung von On-Board-Emissionstests mit tragbaren Emissionsmesssystemen (PEMS) wird immer häufiger zu einem üblichen Ansatz für die reale Emissionsprüfung von PKW, leichten Nutzfahrzeugen und Schwerlastfahrzeugen und ist auch in der Emissionsgesetzgebung bei der Typisierung vorgeschrieben. Die Vorteile gegenüber Rollentests sind die Robustheit, mit der reale Emissionswerte erhalten werden sowie die Abdeckung einer großen Variabilität realer Fahrsituationen, zumindest, wenn mehrere Fahrten unternommen werden. Nachteile für den Einsatz bei der Emissionsmodellierung sind der hohe Einfluss der Strecke, des Fahrers, der Verkehrslage und der Umgebungstemperatur auf die daraus resultierenden Emissionen. Bei PKW können bei PEMS-Mehrfachtests an identischen Fahrzeu-

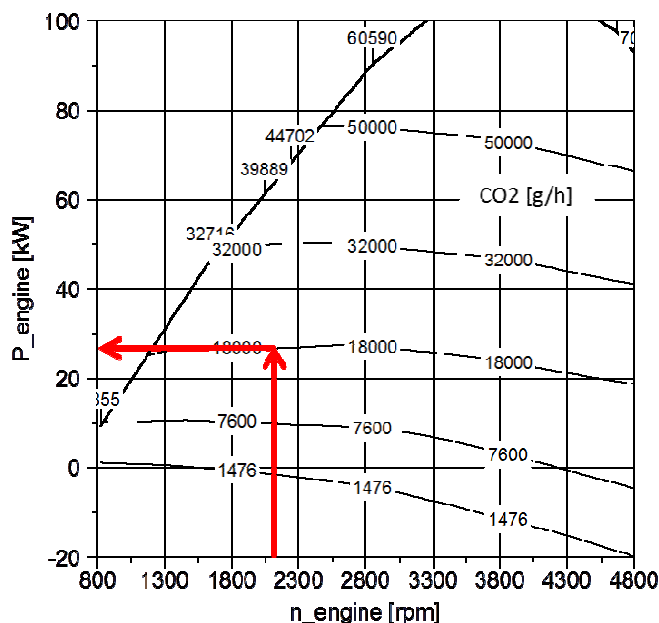
gen sehr unterschiedliche Emissionsniveaus gemessen werden, z.B. Abbildung 42. Die bekannten PEMS-Auswertetools (EMROAD und Powerbinning sowie eine Normierung anhand der gemessenen CO<sub>2</sub>-Emissionen) können die unterschiedlichen Emissionsniveaus nicht ausreichend ausgleichen. Damit kann aus einer PEMS Messung nicht direkt auf ein für das Kfz repräsentatives Emissionsniveau geschlossen werden, solange die Fahrzustände in einem PEMS Trip nicht standardisiert und somit vergleichbar sind. Genau das, nämlich schon vorab bekannte Fahrzustände, will man aber mit PEMS Messungen verhindern. Somit bleibt die Option, die Messdaten in die Motoremissionskennfelder des Modells PHEM zu integrieren und damit dann genormte Fahrzustände zu berechnen.



**Abbildung 42: PEMS Messergebnisse der FVT an einem EU6 Diesel-PKW auf drei verschiedenen Strecken im Raum Graz mit Fahrstilen von Eco-, Normal- und emissionsprovozierend.**

Beim Einrastern von PEMS Daten in Motorkennfelder besteht das Problem, dass fast keines der PEMS-Daten ein zuverlässiges Motordrehmoment-Signal enthält und eine Simulation des Motordrehmoments mit den Unsicherheiten bezüglich des realen Luftwiderstands, des Rollwiderstands, des Steigungswiderstandes sowie der Beladung zu einer ungenauen Einschätzung der Motorleistung führt.

Im neuen Ansatz wird die in der PEMS-Messung aufgezeichnete Motordrehzahl und CO<sub>2</sub>-Emission zu jeder Sekunde genutzt um die Motorleistung aus einem zuvor auf dem Motorprüfstand aufgenommenem Motordrehzahl-/Motorleistung-/CO<sub>2</sub>-Kennfeld zu interpolieren (Abbildung 43). Da es nicht wirtschaftlich sinnvoll wäre, bei jedem Kfz zuerst den Motor für Prüfstandmessungen auszubauen, werden durchschnittliche Verbrauchskennfelder in Abhängigkeit von Technologie und Baujahren verwendet. Die typischen Unterschiede im spezifischen Verbrauch verschiedener Motoren mit ähnlicher Technologie liegen zumindest bei PKW und Nutzfahrzeugen meist unter 5%. Dieser Fehler kann sich also auch bei der Interpolation der Leistung aus einem generischen Kennfeld einstellen, ist aber bei der Berechnung von Schadstoffemissionen tolerierbar.



**Abbildung 43: Beispiel für die Interpolation der Motorleistung aus einem generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld**

Im Allgemeinen zeigen Verbrauchskennfelder, die auf Motorprüfständen gemessen wurden dafür eine viel bessere Qualität als die Kennfelder, die aus transienten Rollentests erzeugt wurden. Hauptgründe für die schlechtere Qualität der transienten Rollentestkennfelder sind die Unsicherheiten in der zeitlichen Ausrichtung zwischen Motordrehmoment und Kraftstofffluss oder CO<sub>2</sub>-Massenstrom, wodurch verzerrte Kennfeldformen beim Verbrauch entstehen können. Bei Schadstoffen sind Messergebnisse von stationären Motortests allerdings wenig belastbar, da Schadstoffemissionen stark vom dynamischen Motorbetrieb beeinflusst werden.

Da die Motordrehzahl auch bei PEMS-Tests ganz einfach und präzise gemessen werden kann, ermöglicht die neue Methode zusätzlich die Erstellung von Motorkennfeldern aus On-Board-Emissions-Testdaten, solange CO<sub>2</sub>, Drehzahl und einige Schadstoffemissionen bei der Messung aufgezeichnet wurden.

Diese Methode zur Kennfelderstellung wurde auch bei den gemessenen 2-Rädern angewandt, da damit in Zukunft beliebige Quellen an Emissionsmessungen verwendet werden können.

## 9.2. Modellerstellung

Nachfolgend sind die Eingangsdaten und die untersuchten Varianten zur Modellerstellung beschrieben.

### 9.2.1. Verfügbare Messungen und Erstellung der Motorkennfelder

Für die Simulation standen aus AP 3 die in Tabelle 12 zusammen gefassten Testfahrten, die alle kalt gestartet wurden, zur Verfügung.

**Tabelle 12: Für die Simulation verfügbare Messungen**

| <b>Fahrzeug</b>      | <b>Fahrzyklus</b> | <b>Durchgeführter Test</b> | <b>Messsysteme</b> |
|----------------------|-------------------|----------------------------|--------------------|
| BMW F800GT           | WMTC              | Rollentest                 | CVS + PEMS         |
|                      | RDC1              | Rollentest                 | CVS + PEMS         |
|                      | RDC3              | Rollentest                 | CVS + PEMS         |
|                      | CADC              | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |
|                      | ERMES             | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |
|                      | WMTC              | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |
|                      | Arzberg           | Realfahrt                  | PEMS               |
|                      | Ries              | Realfahrt                  | PEMS               |
|                      | Gaberl            | Realfahrt                  | PEMS               |
| KTM 125 Duke         | RDC1              | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |
|                      | RDC2              | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |
|                      | CADC              | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |
|                      | ERMES             | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |
|                      | WMTC2-1           | Rollentest ohne AB-Teil    | CVS + PEMS + FTIR  |
| Honda Zoomer         | ECER47            | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |
|                      | RDM               | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |
| Peugeot Speedfight 3 | ECER47            | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |
|                      | RDM               | Rollentest                 | CVS + PEMS + FTIR  |

Insgesamt lagen für die vier Zweiräder (2xMotorrad, 2xRoller) zwei am Motorprüfstand aufgenommene Motorkennfelder vor um die Leistung mittels der CO<sub>2</sub>-Interpolationsmethode durchzuführen (siehe Kap. 9.1.3)<sup>2</sup>. Für die Motorräder lag ein Motorkennfeld von der BMW F800GT vor während für die Roller eine Kennfeldmessung eines CPI-Rollers vorlag. Abbildung 44 zeigt die Lage der gemessenen Verbrauchspunkte des BMW F800GT Kennfeldes. Mit dem sekundlichen CO<sub>2</sub> Wert und der gemessenen Motordrehzahl konnte somit die zugehörige Motorleistung aus dem Kennfeld interpoliert werden. Diese Funktionalität ist in der Software PHEM mittlerweile integriert.

<sup>2</sup> Wie zuvor beschrieben müssen für eine effiziente Nutzung der Methode auch für 2-Räder generische Verbrauchskennfelder für verschiedene Motortechnologien zusammengestellt werden. Diese können dann für alle Tests verwendet werden, für die keine gemessenen Verbrauchskennfelder verfügbar sind. Hier wurde für Motorräder das BMW-Kennfeld und für die Mopeds das CPI-Kennfeld als generisches Verbrauchskennfeld vorgegeben.

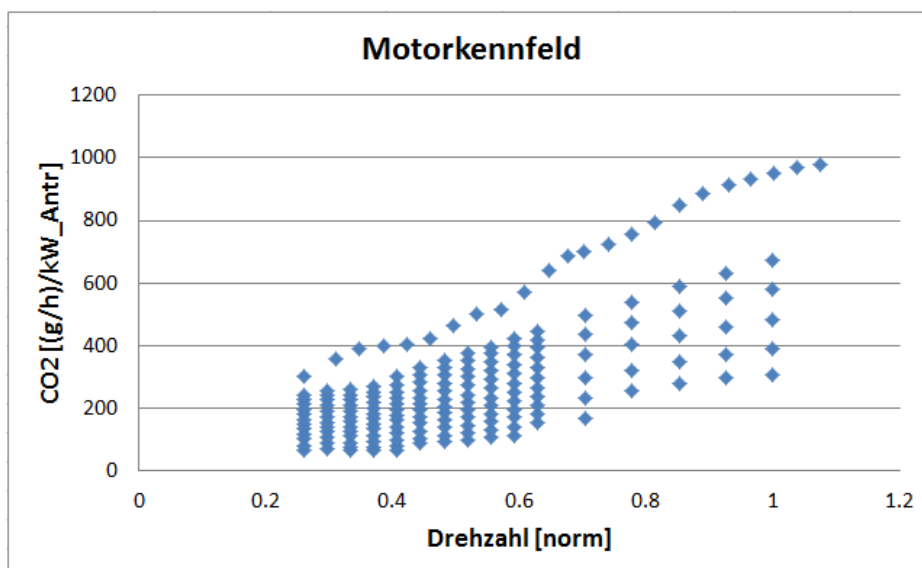


Abbildung 44: Lage der Leistungspunkte im CO<sub>2</sub>-Motorkennfeld der BMWF800GT

Das jeweilige Motorkennfeld (Roller, Motorrad) wurde in das für PHEM standardisierte Format umgewandelt. Dazu wurde es in eine konstante normierte Drehzahl-Leistungsrasterung von 0.05er Schritten überführt. Bereiche die nicht von der Messung abgedeckt waren wurden durch lineare Inter-/Extrapolation mittels Willans-Linien<sup>3</sup> ermittelt.

### 9.2.2. Erstellung der Emissionskennfelder und Simulation der Rollentests

Als erster Schritt wurden die Rollenmessungen in der Simulation untersucht, da bei diesen alle Emissionsmessgeräte verbaut waren (CVS-Standard, PEMS, FTIR) und die eingestellten Fahrwiderstände und die Fahrzyklen genau definiert sind. Somit waren direkte Vergleiche zwischen Messgeräten und zwischen Simulation und Messwerten möglich. Die Vergleiche der Messgeräte wurden schon zuvor beschrieben.

Das Modell PHEM wurde 2017 so erweitert, dass es aus einem Eingabedatensatz („Messfile“) mit den Messwerten (Geschwindigkeit, Motordrehzahl, CO<sub>2</sub> und Schadstoffemissionen in [g/h]) automatisch mit dem ausgewählten generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld die Leistung zeitaufgelöst berechnet und dann die Schadstoffemissionen aus dem Messfile in das leistungs-/Drehzahlkennfeld ein rastert. Mit dieser Option wurden die Emissionskennfelder aus den verfügbaren real world Zyklen der Rollentests erstellt. Die Kaltstartphase zu jedem Testbeginn wurde dafür nicht verwendet.

Genutzt für die Kennfelderstellung wurden dabei die in Tabelle 13 angegebenen Komponenten vom jeweiligen Messsystem (Der Vergleich zwischen den Messsystemen erfolgte vorab, Mehrfachmessungen sind deswegen nicht mit ins Kennfeld einbezogen).

<sup>3</sup> Dabei wird von einer linearen Verbrauchsfunktion [g/h] über der Motorleistung bei konstanter Drehzahl ausgegangen.



**Tabelle 13: Genutzte Komponenten der Messungen für PHEM Kennfelderstellung**

| Komponente                    | Messsystem |
|-------------------------------|------------|
| CO <sub>2</sub>               | PEMS       |
| CO                            | PEMS       |
| NO <sub>x</sub>               | PEMS       |
| HC                            | CVS        |
| C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> | FTIR       |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | FTIR       |
| CH <sub>4</sub>               | FTIR       |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | FTIR       |
| HCHO                          | FTIR       |
| Benzol                        | FTIR       |
| NH <sub>3</sub>               | FTIR       |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | FTIR       |

Für die Simulation wurden nicht immer alle zur Verfügung stehenden Messungen herangezogen. Grund dafür sind bei der Messung nicht aufgezeichnete Emissionskomponenten, z.B. wegen Ausfall eines Analysators. Tabelle 14 gibt einen Überblick mit welchen CO<sub>2</sub>-Motorkennfeldern und aus welchen Messungen die Summenkennfelder der jeweiligen Fahrzeuge erstellt wurden.

**Tabelle 14: Genutzte Motorkennfelder und Messungen zur Summenkennfelderstellung**

| Fahrzeug             | Generisches CO <sub>2</sub> Kennfeld | Summenkennfeld aus      | Nicht genutzt                                     |
|----------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| BMW F800GT           | BMW F800GT                           | RDC1, CADC, ERMES, WMTC | RDC3 – CVS Ausfall                                |
| KTM 125 Duke         | BMW F800GT                           | CADC, ERMES, WMTC       | RDC1 – Keine HC Messung<br>RDC2 – CVS ausgefallen |
| Honda Zoomer         | CPI- Roller                          | ECER47, RDM             |                                                   |
| Peugeot Speedfight 3 | CPI- Roller                          | ECER47                  | RDM – Ungewöhnlich hohe HC + CO                   |

Mit diesen Daten wurden folgende Simulationen, jeweils für jede Messung alleine als auch für alle Messungen des jeweiligen Fahrzeuges zusammen durchgeführt:

- 1) Erstellung eines PHEM-Motorkennfeldes aus Drehzahl, Leistung, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> sowie den Sondergasen (Benzol, C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>, ...). Die Leistung wurde dabei aus dem Motorkennfeld über die aufgenommenen Drehzahl- und CO<sub>2</sub>-Werte interpoliert.
- 2) Simulation des gemessenen Geschwindigkeits-/Drehzahlverlaufs mit dem jeweiligen generierten PHEM-Motorkennfeld zur Genauigkeitsüberprüfung der Kennfelderstellung und Emissionssimulation. Die Leistung wird dabei über ein Längsdynamikmodell

ermittelt. Für die Berechnung wurde die aufgenommene Drehzahl aus der Rollenmessung genutzt<sup>4</sup>.

Durch die Erstellung eines Summenkennfeldes, bei dem alle verfügbaren Messungen zur Kennfelderstellung herangezogen werden, wird eine große Kennfeldabdeckung erreicht, wodurch Extrapolationen vermieden werden sollen, die zu Ungenauigkeiten führen. Bei der Simulation der jeweiligen Zyklen mit dem erstellten Summenkennfeld zeigen sich ohne weitere Kalibrierung teilweise größere Unterschiede zur Messung der einzelnen Zyklen. Bei der KTM (siehe Tabelle 15) sind dies im Verbrauch (~ 5-20%), den Emissionen (~1-20%) und Sondergasen (~1-40%).

**Tabelle 15: Vergleich von Messung und Simulation der KTM bei Nutzung des Summenkennfeldes ohne Kalibrierung des generischen CO<sub>2</sub>-Motorkennfeldes**

| KTM                           | Alle Zyklen | CADC | ERMES | WMTC | RDC1 | RDC2 | Mittl. abs. Abw. |
|-------------------------------|-------------|------|-------|------|------|------|------------------|
| CO                            | -1%         | -1%  | 4%    | 38%  | -20% | -8%  | 15%              |
| CO <sub>2</sub>               | -7%         | -5%  | 0%    | -24% | -12% | -9%  | 6%               |
| NO <sub>x</sub>               | -4%         | 0%   | -1%   | -21% | -12% | -5%  | 7%               |
| HC                            | -2%         | -2%  | -6%   | 4%   | -    | 0%   | 3%               |
| C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> | 3%          | 24%  | -1%   | 8%   | -22% | -6%  | 12%              |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0%          | 16%  | 5%    | -19% | -11% | -9%  | 12%              |
| CH <sub>4</sub>               | -2%         | 14%  | 2%    | -11% | -19% | -11% | 10%              |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | -3%         | 14%  | 1%    | -16% | -20% | -13% | 11%              |
| HCHO                          | -1%         | 14%  | 0%    | -10% | -10% | -10% | 8%               |
| Benzol                        | -40%        | 255% | -73%  | 402% | -64% | 0%   | 180%             |
| NH <sub>3</sub>               | 10%         | 36%  | 11%   | 162% | -22% | -6%  | 50%              |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | 18%         | -6%  | 295%  | -26% | 48%  | -4%  | 94%              |

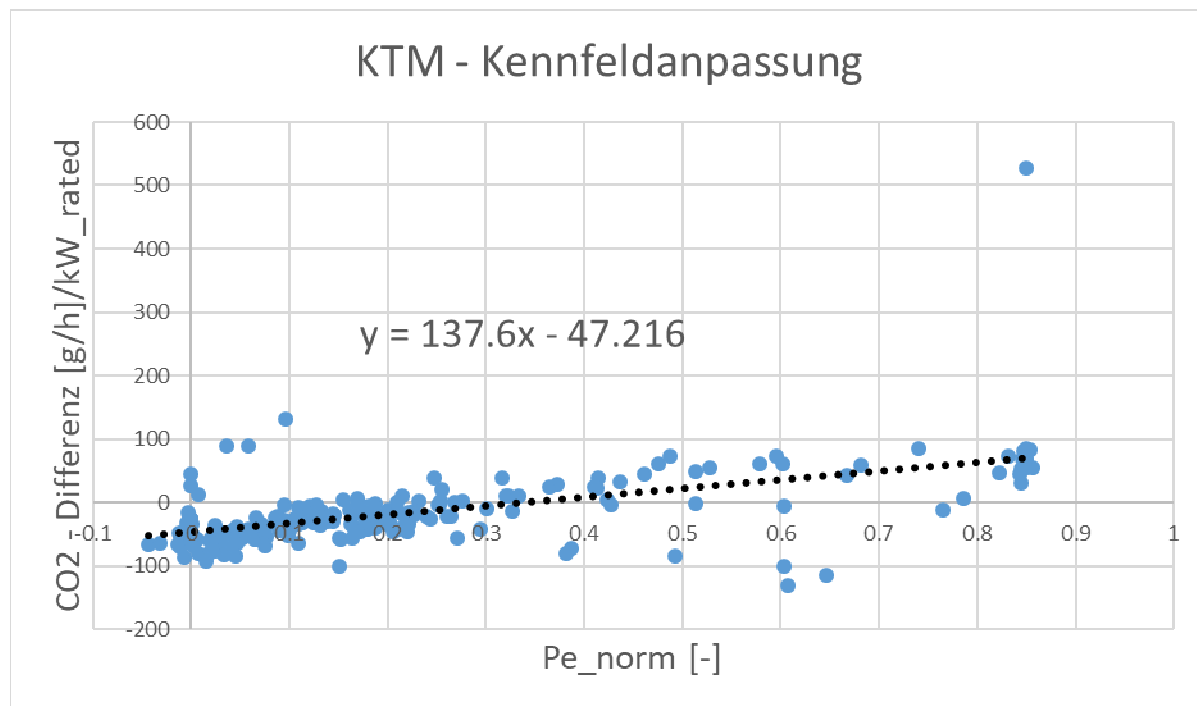
Diese größeren Abweichungen können darauf zurückzuführen sein, dass das generische CO<sub>2</sub>-Motorkennfeld für das spezielle Kfz nicht unbedingt repräsentativ und die Leistungswerte für die durchgeführte Einrastung über Leistung und Drehzahl somit nicht korrekt ist<sup>5</sup>. Da bei dieser Methode aus dem gemessenen CO<sub>2</sub> die Leistung berechnet wird und das gemessene dann entsprechend der so berechneten Leistung in das Kennfeld gerastert wird, ergibt sich für CO<sub>2</sub> und Verbrauch immer das generische Kennfeld. Um das generische CO<sub>2</sub>-Kennfeld an den realen Motor anzupassen, können – sofern vorhanden – die Rollentests am Kfz verwendet werden. Wenn mit dem generischem Kennfeld der Rollentest mit den dabei eingestellten Massen und Fahrwiderständen nachgerechnet wird, dann zeigt die Abweichung vorwiegend die Unterschiede im CO<sub>2</sub> Kennfeld des realen Motors zum generischen Kennfeld.

<sup>4</sup> Durch Verwendung der gemessenen Drehzahl gehen eventuelle Fehler im Schaltmodell nicht in die Analyse des Motormodells ein

<sup>5</sup> Derselbe Effekt ist auch bei den beiden Rollersimulationen aufgetreten, da für die Roller nur ein Motorkennfeld der CPI vorlag und kein spezifisches für die beiden vermessenen Roller (Honda Zoomer und Peugeot Speedfight 4).

Da bei Rollentests aber der Leistungsverbrauch von Nebenaggregaten unbekannt ist, müssen diese in PHEM für die Nachrechnung abgeschätzt werden, was auch zu Unterschieden in gemessenem und simuliertem Verbrauch führt. Da die Nebenaggregate bei niedriger Motorleistung einen hohen Anteil an der Motorarbeit haben können, ist dort auch der Fehler durch Nebenaggregateinflüsse hoch. Diese Fehler werden bei der nachfolgend beschriebenen Kalibrierung dem Kennfeld zugeordnet.

Zur Kalibrierung des generischen CO<sub>2</sub>-Motorkennfeldes werden die sekundlichen Abweichungen zwischen Simulation mit generischem Kennfeld und Messung über der berechneten und normierten Motorleistung aufgetragen (siehe Abbildung 45).



**Abbildung 45: Bestimmung der Ausgleichsgeraden zur Kennfeldanpassung bei der KTM125 Duke**

Mit dieser Ausgleichsgeraden, die natürlich für jedes Kfz separat erstellt wurde, wurde das jeweilig genutzte Motorkennfeld angepasst, indem die Differenz laut der Kalibriergleichung in Abbildung 45, im generischen Kennfeld als Funktion der Leistung des Kennfeldpunktes aufgeschlagen wird. Der Leerlaufpunkt wurde getrennt kalibriert, indem aus allen verfügbaren Messungen des jeweiligen Fahrzeugs die Leerlaufemissionen bei warmem Motor abgegriffen wurden.

Mit dem so kalibrierten generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld wurde die Kennfelderstellung und die Simulation der Einzelmessungen und Gesamtmessung wie in 1) und 2) beschrieben erneut durchgeführt. Mit dem kalibrierten generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld ergeben sich deutlich bessere Simulationsergebnisse. In Tabelle 16 sind die Simulationsergebnisse der KTM nach der Motorkennfeldanpassung abgebildet.

**Tabelle 16: Abweichung von Simulation zur Messung für die KTM Duke bei der Nutzung des Summenkennfelds ohne RDE Messungen mit Kalibrierung des generischen CO<sub>2</sub>-Motorkennfeldes**

| KTM                           | Gesamt | CADC | ERMES | WMTC | RDC1 (*) | RDC2 (*) | Mittl. abs. Abw. |
|-------------------------------|--------|------|-------|------|----------|----------|------------------|
| CO                            | 2%     | -1%  | 1%    | 72%  | -33%     | -10%     | 32%              |
| CO <sub>2</sub>               | 0%     | 5%   | -2%   | -10% | -10%     | -7%      | 5%               |
| NO <sub>x</sub>               | -1%    | 5%   | -5%   | -8%  | -13%     | -6%      | 5%               |
| HC                            | 4%     | 5%   | 0%    | 14%  | -        | 6%       | 5%               |
| C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> | 5%     | 19%  | -4%   | 8%   | -27%     | -8%      | 8%               |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 3%     | 15%  | -3%   | -9%  | -19%     | -16%     | 9%               |
| CH <sub>4</sub>               | 4%     | 14%  | -3%   | -2%  | -25%     | -13%     | 8%               |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 3%     | 15%  | -4%   | -8%  | -25%     | -16%     | 9%               |
| HCHO                          | 3%     | 15%  | -3%   | -8%  | -13%     | -12%     | 9%               |
| <b>Benzol</b>                 | 18%    | 591% | -19%  | 222% | -38%     | 182%     | 218%             |
| NH <sub>3</sub>               | 5%     | 14%  | -2%   | 105% | -34%     | -17%     | 44%              |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | -1%    | -22% | 108%  | -15% | -1%      | -42%     | 57%              |

(\*)...Messung wurde hier nicht ins Summenkennfeld mit eingearbeitet aber nachsimuliert.

Die Simulation mit Summenkennfeldern aus den RDC Rollentests wird später gezeigt

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen nun bei der Nachrechnung aller Messungen (Gesamt) bei < 1% Abweichung im Vergleich zur Messung, während die Abweichungen regulierter Schadstoffe und Sondergase (Ausnahme Benzol) kleiner 10% sind. Beim Nachsimulieren der einzelnen Messungen ergeben sich größere Abweichungen von +- 10% bei CO<sub>2</sub>-Emissionen, +20% bei CO (Ausnahme WMTC), 10% bei NO<sub>x</sub> und HC sowie stärker streuende Abweichungen bis zu +-25% bei den Sondergasen (Ausnahme Benzol und Ammoniak). Die RDC1 und RDC2 Messung sind hier nicht mit in die Summenkennfelderstellung eingegangen, verfügen allerdings über eine wesentlich größere Kennfeldabdeckung als die übrigen Messungen. Dadurch wird bei der Nachsimulation in Kennfeldbereiche extrapoliert für die keine Messpunkte verfügbar waren. Die Ergebnisse zeigen allerdings dennoch gute Übereinstimmungen in den CO<sub>2</sub>, CO und NO<sub>x</sub> Emissionen.

Werden die RDC1 und RDC2 Messungen mit in die Kennfelderstellung mit einbezogen ergeben sich geringfügig genauere Ergebnisse in den einzelnen Zyklen (HC konnte nicht verglichen werden da es in den RDC-Messungen nur teilweise vorhanden war). Lediglich der CADC Zyklus ergibt größere Abweichungen, da dieser in seinem gemessenen Kennfeldbereich höhere Emissionen aufweist als die anderen Messungen. Die Sondergase ergeben ähnlich größere prozentuale Abweichungen wie bei der Simulation ohne Berücksichtigung der RDC-Messungen im Summenkennfeld.

**Tabelle 17: Abweichung von Simulation zur Messung für die KTM Duke bei der Nutzung des Summenkennfelds mit RDC Messungen mit Kalibrierung des generischen CO<sub>2</sub>-Motorkennfeldes**

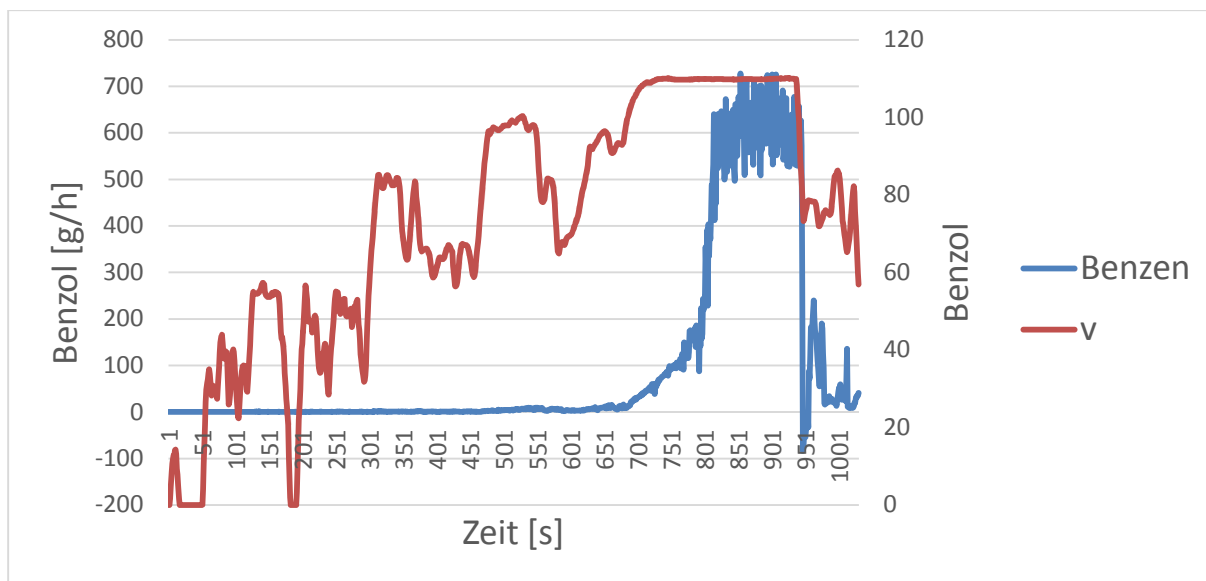
| KTM                           | Gesamt | CADC | ERMES | WMTC | RDC1 | RDC2 | Mittl. Abw. | abs. |
|-------------------------------|--------|------|-------|------|------|------|-------------|------|
| CO                            | -1%    | 7%   | 6%    | 96%  | -10% | -3%  |             | 31%  |
| CO <sub>2</sub>               | 0%     | 11%  | 3%    | -4%  | -5%  | -2%  |             | 5%   |
| NO <sub>x</sub>               | 0%     | 12%  | 3%    | -5%  | -7%  | 1%   |             | 5%   |
| HC                            | -      | -    | -     | -    | -    | -    |             | -    |
| C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> | 0%     | 32%  | 2%    | 22%  | -13% | 0%   |             | 15%  |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0%     | 22%  | 5%    | -6%  | -6%  | -7%  |             | 10%  |
| CH <sub>4</sub>               | -1%    | 23%  | 5%    | 3%   | -10% | -5%  |             | 9%   |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | -1%    | 26%  | 7%    | -2%  | -12% | -5%  |             | 11%  |
| HCHO                          | 0%     | 22%  | 3%    | -4%  | -6%  | -6%  |             | 9%   |
| Benzol                        | -17%   | 452% | -44%  | 329% | -39% | 95%  |             | 185% |
| NH <sub>3</sub>               | 1%     | 37%  | 10%   | 195% | -13% | -4%  |             | 60%  |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | -3%    | -19% | 136%  | -14% | 17%  | -33% |             | 47%  |

Die Ursachen der größeren prozentuellen Abweichungen bei den Sondergasen dürften sein:

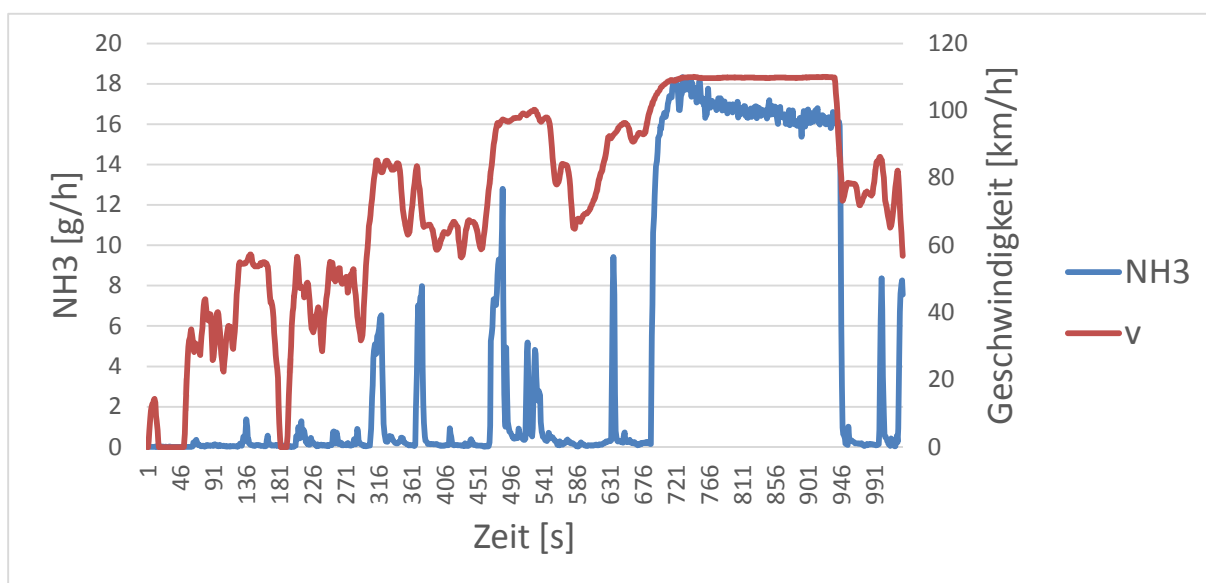
1. Dass die Absolut Mengen der Sondergase meist sehr klein (Ausnahme sind die Benzole) sind, wodurch bereits ein Ausreißer bei der Messung, der in der Simulation nicht nachgerechnet wird sehr hohe relative Abweichungen bewirkt.
2. Dass die Emissionsmenge der Sondergase eher von einzelnen starken Peaks bestimmt wird, und diese mit dem kennfeldbasierten Ansatz offensichtlich nicht hinreichend abgebildet sind.
3. Vermutlich Messartefakte bei Benzol, CH<sub>4</sub> und NH<sub>3</sub> in einzelnen Zyklen (siehe z.B. Abbildung 46). Diese Zyklen wurden in der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Bei Benzol und Ammoniak wurden mit dem FTIR teilweise sehr hohe Emissionen gemessen. Die hohen Emissionen traten bei Vollast sowie im Autobahnteil auf, wenn die Drosselklappe komplett öffnet. Hohe HC Emissionen sind dabei zu erwarten, da aus Bauteilschutzgründen der Motor i.A. dort im fetten Betrieb ist. Solche Messergebnisse waren bei der KTM hier im ERMES, RDC1 und RDC2 Zyklus bei dem Benzol, NH<sub>3</sub> und C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> Emissionen (siehe Abbildung 46 - Abbildung 47) fest zu stellen. Bei einer durchgeführten Nachmessung eines Zyklus traten diese Emissionserhöhungen nicht wieder auf. Es handelt sich somit eventuell um ein Messartefakt, deren Ursache derzeit noch nicht geklärt ist. Möglich ist, dass der Vorfilter des FTIR verlegt war.

Durch diese zeitweise hohen Emissionen entstehen im Summenkennfeld Bereiche mit sehr hohen Emissionen die bei anderen Messungen in diesem Kennfeldbereich nicht in dieser Höhe entstanden sind (vergleiche Abbildung 46 - Abbildung 47). Beim Nachsimulieren von „normalen“ Testergebnissen ergeben sich dann zu hohe Werte gegenüber den sonst eher niedrigen Emissionen, die zu den in Tabelle 17 dargestellten Abweichungen von bis zu +600% führen.



**Abbildung 46: Benzol Verlauf im ERMES-Zyklus der KTM Duke. Vermutlich ein Messartefakt durch verlegten Vorfilter im FTIR**



**Abbildung 47: NH3 Verlauf im ERMES-Zyklus der KTM Duke. Vermutlich ein Messartefakt durch verlegten Vorfilter im FTIR**

Insgesamt ergeben sich die in Tabelle 18 dargestellten Simulationsgenauigkeiten bei den untersuchten 2-Rädern wenn alle Tests zur Kennfelderzeugung verwendet werden.

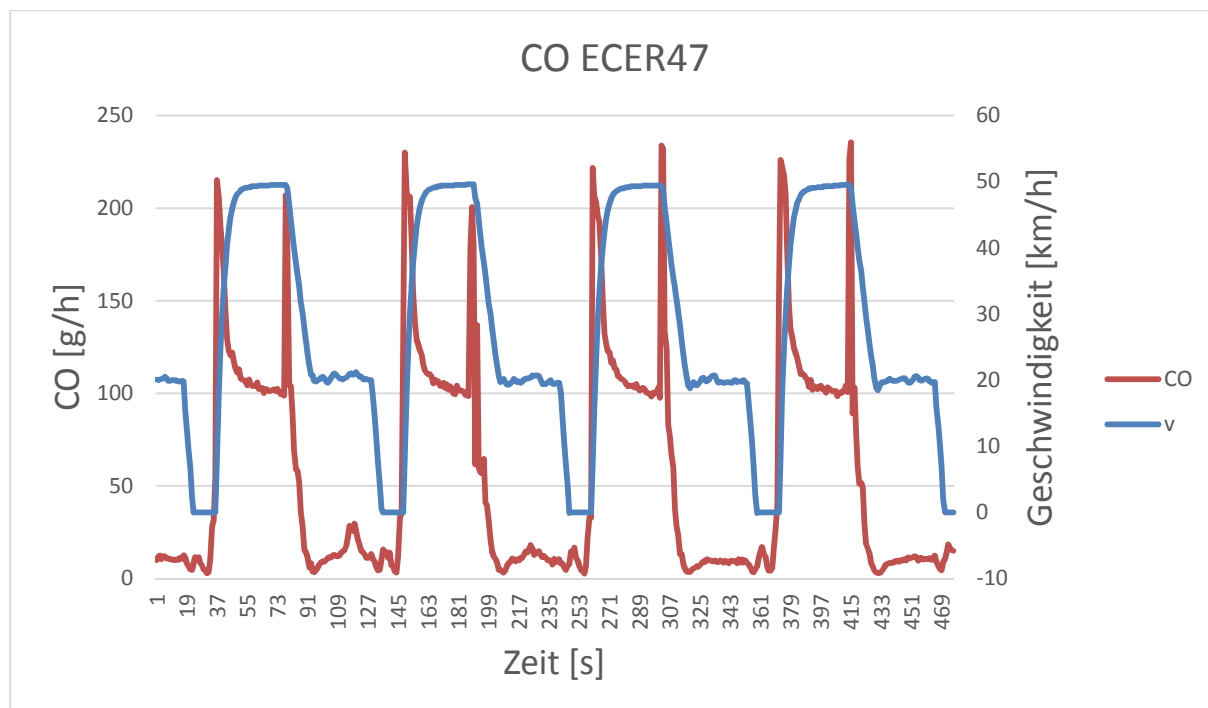


**Tabelle 18: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für die Gesamtmessungen (alle Rollen- und PEMS Test seriell simuliert mit Kennfeld aus allen Tests, ohne Zyklen mit Messartefakten)**

|                               | Motorrad   |              | Roller       |                      |
|-------------------------------|------------|--------------|--------------|----------------------|
|                               | BMW F800GT | KTM 125 Duke | Honda Zoomer | Peugeot Speedfight 3 |
| CO                            | 9%         | 2%           | 24%          | 25%                  |
| CO <sub>2</sub>               | -1%        | 0%           | 0%           | 0%                   |
| NO <sub>x</sub>               | 8%         | -1%          | -9%          | -15%                 |
| HC                            | 4%         | 4%           | -2%          | -14%                 |
| C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> | -          | 5%           | -7%          | -24%                 |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | -          | 3%           | -4%          | -3%                  |
| CH <sub>4</sub>               | -          | 4%           | -3%          | -3%                  |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | -          | 3%           | -14%         | -16%                 |
| HCHO                          | -          | 3%           | -5%          | -5%                  |
| Benzol                        | -          | 18%          | -13%         | 30%                  |
| NH <sub>3</sub>               | -          | 5%           | -5%          | -11%                 |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | -          | -1%          | -11%         | -45%                 |

Die erreichte Genauigkeit bei Verwendung aller Tests zur Kennfelderzeugung ist zufriedenstellend. Lediglich bei den CO Emissionen gibt es bei den Rollern Abweichungen im Bereich von +25%. Grund für die größere Abweichung ist, dass bei annähernd konstant bleibender Last die gemessenen Emissionen mit der Zeit abnehmen (siehe Abbildung 48). Da die Emissionen gleicher Last bei der Kennfelderstellung gemittelt werden, wird bei der Nachsimulation lediglich der Mittelwert in diesem Lastbereich berechnet. Zusätzlich entstehen größere Abweichungen bei den einzelnen Spitzenwerten, die nicht in voller Höhe nachsimuliert werden. Signifikante Abhängigkeiten von messbaren Dynamikparametern wurden nicht gefunden, so dass eine Korrektur der simulierten Werte mittels Berücksichtigung von Dynamikeffekten<sup>6</sup> oder Katalysatorsimulation keine bessere Genauigkeit ergab.

<sup>6</sup> Dabei werden mögliche Abhängigkeiten der Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Emissionen von Dynamikparametern mittels multipler Regressionsanalyse untersucht. Dynamikparameter sind Variationen von Beschleunigungen, Leistungs- und Drehzahländerungen über kurze Zeiträume vor jedem einzelnen Emissionsevent.



**Abbildung 48: Stetiger Abfall der Emissionen bei gleicher Last im ECER47 Zyklus der Peugeot Speedfight 3**

Zum Vergleich, bei PKW sind bei Verbrauch und CO<sub>2</sub> Abweichungen bis etwa 5% typisch, für Schadstoffe bis 20%. Einzelne PKW zeigen bei der Basissimulation aber auch deutlich höhere Abweichungen, wenn die Abgasemissionen neben Leistung und Drehzahl auch von anderen Größen stark abhängen (z.B. bei hoher Empfindlichkeit auf Zyklusdynamik).

Im Vergleich dazu zeigt Tabelle 19 das Ergebnis für die Simulation mit Kennfeldern nur aus den Rollen-Real World Testzyklen für Zweiräder (RDC bzw. RDM). Diese Anwendung stellt ja die vermutliche Vorgehensweise bei zukünftigen Messkampagnen vor, bei denen speziell die RDC und RDM Zyklen als Basis für die Kennfelderzeugung verwendet werden.

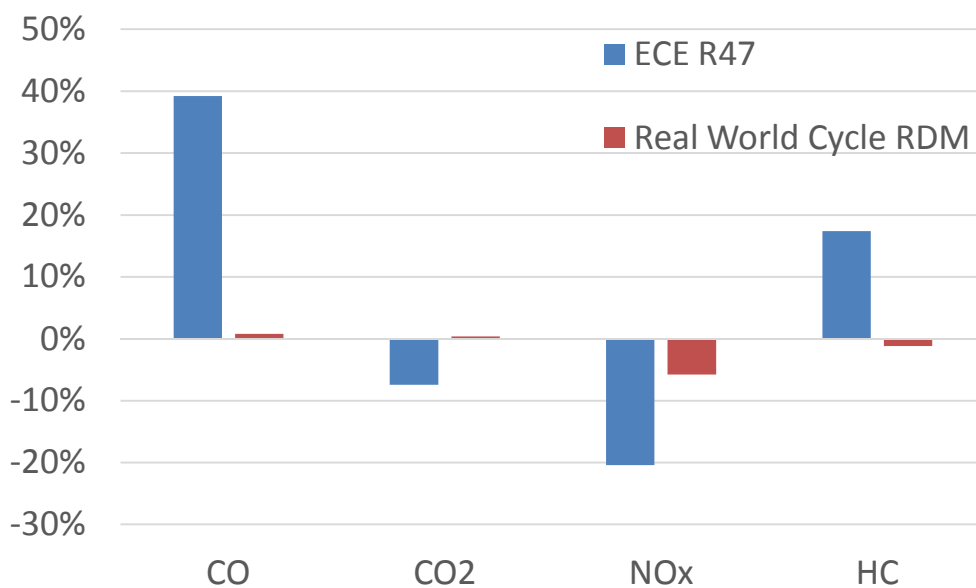
Die erreichten Genauigkeiten sind auch hier zufriedenstellend. Lediglich bei den CO Emissionen der Roller ergeben sich Abweichungen von +20%. Die Ursache für die höhere Abweichung bei der Honda Zoomer ist hier die gleiche wie vorher und ist auf einzelne Peaks zurückzuführen. Bei der Peugeot ergeben sich bei der RDM Messung sehr viel höhere Emissionen (CO + HC) als in der ECE R47 Messung. Dadurch ergeben sich im ECE R47 Bereich der Gesamtzyklussimulation (durchgeführt mit dem Kennfeld erstellt aus der RDM Messung) größere Abweichungen, die diese höheren Abweichungen in CO und HC verursachen. Wieso die Emissionen bei diesem Motorrad im RDM so viel höher liegen als im ECE R47 konnte nicht ermittelt werden. Es ist aber ein ähnlicher Effekt zu vermuten wie bei PKW, nämlich, dass die Kfz speziell auf den Typprüfzyklus optimiert sind und damit eine Simulation aus real world Kennfeldern zu einer Überschätzung führt.

**Tabelle 19: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für die Gesamtmessungen (alle Rollen- und PEMS Test seriell simuliert mit Kennfeld aus den RDC bzw. RDM Tests, ohne Zyklen mit Messartefakten)**

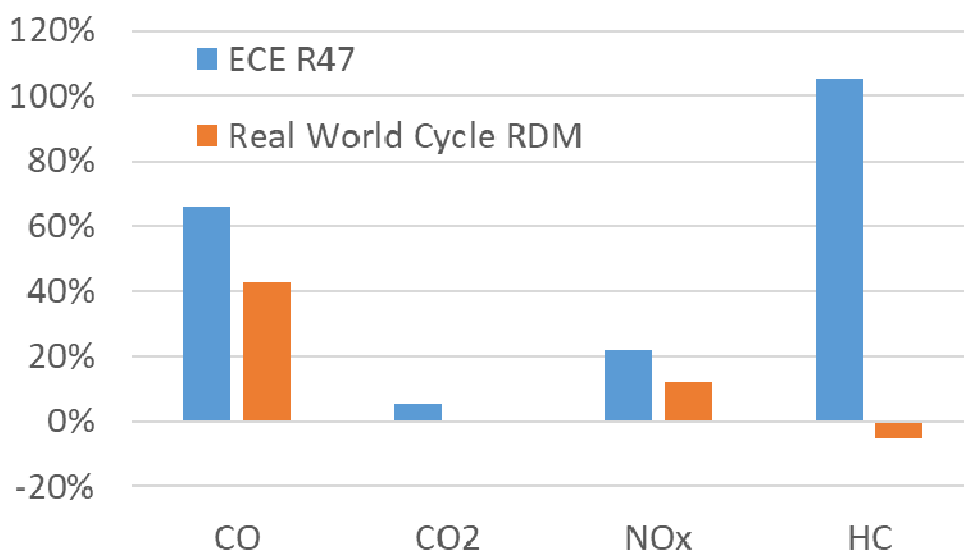
|                               | Motorrad   |              | Roller       |                      |
|-------------------------------|------------|--------------|--------------|----------------------|
|                               | BMW F800GT | KTM 125 Duke | Honda Zoomer | Peugeot Speedfight 3 |
| CO                            | 6%         | 4%           | 21%          | 57%                  |
| CO <sub>2</sub>               | 7%         | 4%           | -4%          | 4%                   |
| NO <sub>x</sub>               | -3%        | 5%           | -15%         | 19%                  |
| HC                            | -          | -            | 9%           | 54%                  |
| C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> | -          | 6%           | 22%          | 34%                  |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | -          | 3%           | 16%          | 5%                   |
| CH <sub>4</sub>               | -          | 5%           | -8%          | 10%                  |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | -          | 6%           | -8%          | 23%                  |
| HCHO                          | -          | 6%           | 3%           | 34%                  |
| Benzol                        | -          | -9%          | -26%         | -75%                 |
| NH <sub>3</sub>               | -          | 10%          | 39%          | 24%                  |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | -          | -9%          | 9%           | 72%                  |

Die Abweichungen zu den einzelnen Zyklen zeigen Abbildung 49 bis Abbildung 52. Es ist zu erkennen, dass die Real World Zyklen bei der Simulation jeweils deutlich besser getroffen werden als die Typprüfzyklen. Daher sollten Typprüfzyklen auch nicht zur Erstellung von real world Kennfeldern verwendet werden.

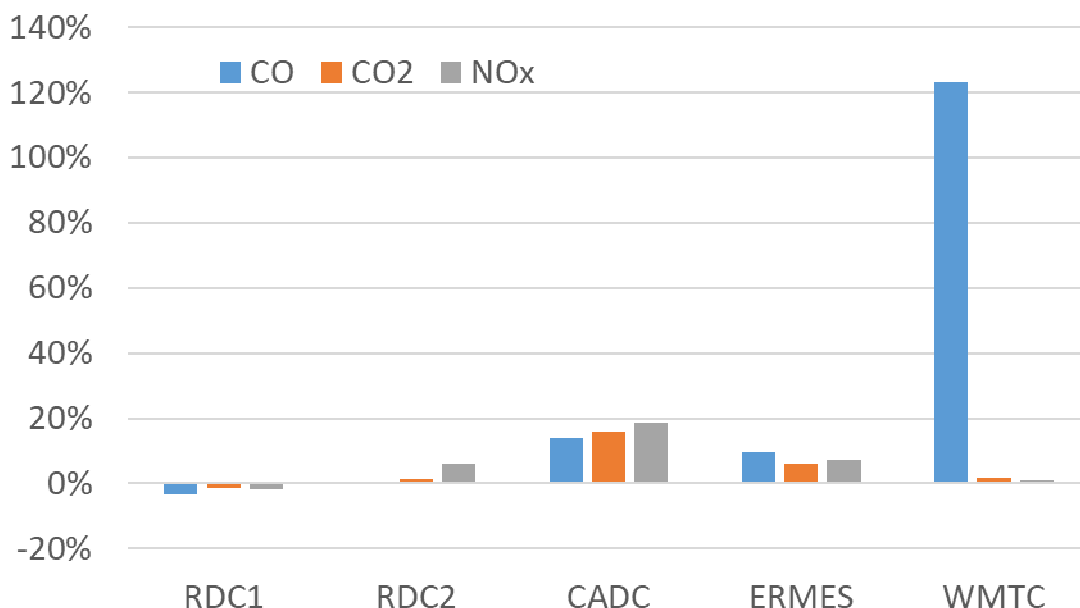
Bei der BMW F800 fällt die große Abweichung bei der NO<sub>x</sub>-Simulation auf. Während der RDC1 naturgemäß mit dem Kennfeld aus diesem Zyklus gut getroffen wird, ergeben sich für CADC, ERMES und WMTC zunehmende Abweichungen bei NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub>. Gründe für dieses Verhalten konnten nicht gefunden werden. Es scheint so, als verursachte das Fahren des RDCs bei diesem Motorrad auch in niederlastigem Betrieb höhere NO<sub>x</sub>- und auch höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen als wenn die weniger anspruchsvollen Zyklen gefahren werden. Eventuell liegt aber auch eine unbeabsichtigte Verstellung der Fahrwiderstände im Messablauf der Rolle vor, das könnte die hohen Abweichungen bei CO<sub>2</sub> erklären.



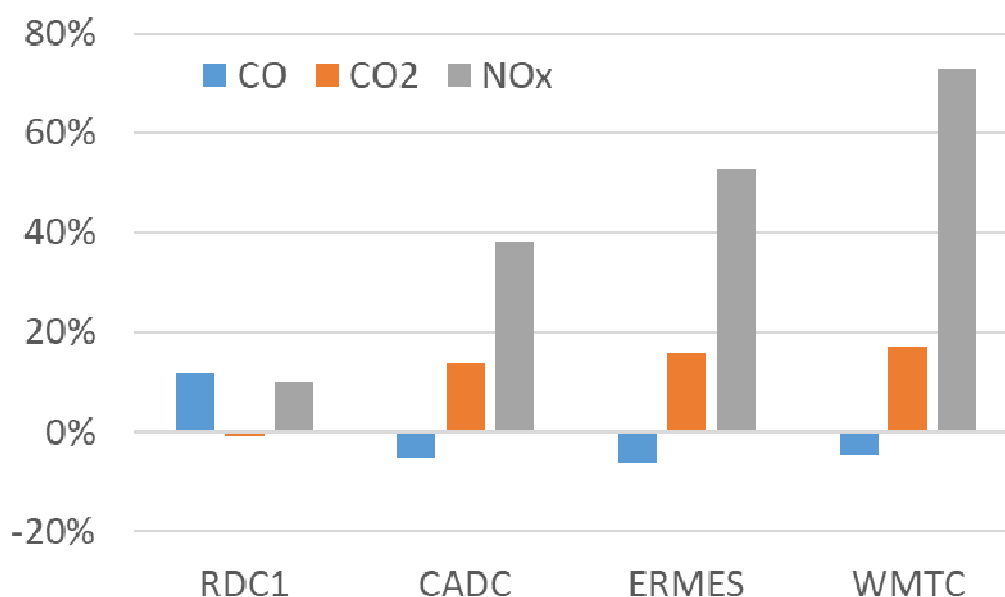
**Abbildung 49: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für den Peugeot Speedfight 3 (simuliert mit Kennfeld aus dem RDM Test)**



**Abbildung 50: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für den Honda Zoomer (simuliert mit Kennfeld aus dem RDM Test)**



**Abbildung 51: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für die KTM 125 Duke (simuliert mit Kennfeld aus den RDC Tests, HC wegen häufigen Analysator-Ausfall nicht dargestellt)**



**Abbildung 52: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für die BMW F800GT (simuliert mit Kennfeld aus dem RDC1 Tests)**

### 9.2.3. Anteile Nicht-Limitierte Abgaskomponenten

Da sowohl Messung als auch Simulation einiger nicht limitierter Emissionskomponenten bei niederen Emissionsniveaus offensichtlich unsicher sind, liegt es nahe für diese Komponenten nur mittlere, prozentuelle Anteile bezogen auf HC und NO<sub>x</sub> anzugeben. Dieser Methode

wurde der Vorzug gegeben, da eine Untersuchung der Abhängigkeit der Sondergase von der Leistung oder vom Absolut-Niveau von HC bzw. NO<sub>x</sub> keinen signifikanten Trend ergab.

Bei der Bestimmung der Anteile in Tabelle 20 - Tabelle 21 wurden Zyklen mit Messsystemausfällen und den oben gezeigten unplausibel hohen Emissionen nicht berücksichtigt. Insgesamt ergeben sich für die 2-Räder, getrennt nach Motorrad und Roller die in Tabelle 20 - Tabelle 21 dargestellten Anteile für die wesentlichsten gemessenen Sondergase.

**Tabelle 20: Prozentuelle Anteile (Mittelwert über beide Testfahrzeuge) der Roller von nicht limitierten Emissionskomponenten an HC und NO<sub>x</sub>**

| Emission                          | Roller         |                             |        |        |
|-----------------------------------|----------------|-----------------------------|--------|--------|
|                                   | Prozent von HC | Prozent von NO <sub>x</sub> | g/km   | g/km   |
| <b>C<sub>4</sub>H<sub>6</sub></b> | 0.45%          | -                           | 0.0181 | -      |
| <b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b> | 0.16%          | -                           | 0.0064 | -      |
| <b>CH<sub>4</sub></b>             | 1.75%          | -                           | 0.0654 | -      |
| <b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b> | 0.54%          | -                           | 0.0144 | -      |
| <b>HCHO</b>                       | 0.94%          | -                           | 0.0431 | -      |
| <b>Benzol</b>                     | 1.34%          | -                           | 0.0193 | -      |
| <b>NH<sub>3</sub></b>             | -              | 3.54%                       | -      | 0.0043 |
| <b>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub></b> | 0.97%          | -                           | 0.0468 | -      |

**Tabelle 21: Prozentuelle Anteile (Mittelwert über beide Testfahrzeuge) der Motorräder von nicht limitierten Emissionskomponenten an HC und NO<sub>x</sub>**

| Emission                          | Motorrad       |                             |        |        |
|-----------------------------------|----------------|-----------------------------|--------|--------|
|                                   | Prozent von HC | Prozent von NO <sub>x</sub> | g/km   | g/km   |
| <b>C<sub>4</sub>H<sub>6</sub></b> | 0.99%          | -                           | 0.0043 | -      |
| <b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b> | 0.34%          | -                           | 0.0023 | -      |
| <b>CH<sub>4</sub></b>             | 4.81%          | -                           | 0.0177 | -      |
| <b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b> | 0.84%          | -                           | 0.0037 | -      |
| <b>HCHO</b>                       | 0.49%          | -                           | 0.0031 | -      |
| <b>Benzol</b>                     | 6.10%          | -                           | 0.0319 | -      |
| <b>NH<sub>3</sub></b>             | -              | 13.16%                      | -      | 0.0196 |
| <b>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub></b> | 0.45%          | -                           | 0.0036 | -      |

Größere Unterschiede ergeben sich bei CH<sub>4</sub>, Benzol und NH<sub>3</sub>, die bei Motorrädern deutlich höher liegen.



### 9.2.4. Erstellung der Emissionskennfelder aus On-Board Messungen

Neben den Rollenmessungen wurden an der BMW F800GT auch mehrere RDE-Messungen durchgeführt. Diese RDE-Messungen bieten im Vergleich zu Rollentests eine größere Kennfeldabdeckung. Um eventuelle Unterschiede im Emissionsniveau bei Rollentests und Straßenfahrten zu detektieren, wurde hier aus den RDE Messdaten ein separates Emissionskennfeld erstellt und mit dem aus den Rollentests erstellten, verglichen. Für die Kennfelderstellung wurde dasselbe generische CO<sub>2</sub>-Kennfeld wie für die Rollentests verwendet. Bei den durchgeführten RDE Messungen wurden allerdings keine FTIR-Daten aufgezeichnet, da FTIR Messsysteme nicht mobil sind.

Die Erstellung des Emissionskennfeldes erfolgt wie in Kapitel 9.2.2 beschrieben. Die Abweichungen zwischen Messung und Simulation mit dem erstellten Kennfeld beim Nachrechnen der Messungen sind in Tabelle 22 dargestellt.

**Tabelle 22 Abweichung zwischen Simulation und Messung für die Straßenfahrten mit der BMW F800GT mit dem aus den Realfahrten erstellten Kennfeld**

| BMW             | Abweichung zur Messung |
|-----------------|------------------------|
| CO              | 8%                     |
| CO <sub>2</sub> | -1%                    |
| NO <sub>x</sub> | -12%                   |

Die Simulationsgenauigkeit liegt in einem zufriedenstellenden Bereich, so dass auf repräsentative RDE-Kennfelder geschlossen werden kann.

Im nächsten Schritt wurde mit den Emissionskennfeldern aus den Rollen- bzw. aus den RDE-Tests die jeweils andere Messserie nachsimuliert. Die Untersuchung konnte lediglich für die BMW F800GT durchgeführt werden, da nur für dieses Fahrzeug sowohl Messungen aus Rollen- als auch aus RDE-Tests vorlagen. Als Eingang für die Simulation wurde jeweils die gemessene Drehzahl und die aus dem generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld berechnete Leistung gewählt, so dass Fehler in der Längsdynamiksimulation das Ergebnis nicht beeinflussen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 23 dargestellt.

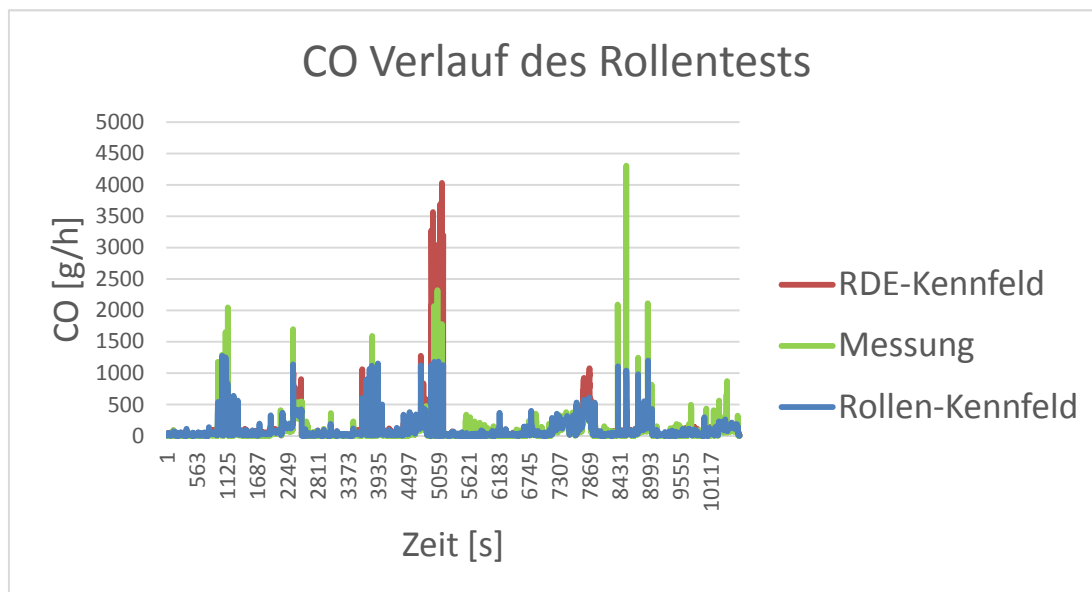
**Tabelle 23: Abweichungen zwischen Simulation und Messung mit Rollen- bzw. RDE Kennfeld für die BMW F800GT**

|                 | Rollentests mit RDE-Kennfeld | RDE-Tests mit Rollen-Kennfeld (mit RDC Messungen) | RDE-Tests mit Rollen-Kennfeld (ohne RDC Messungen) |
|-----------------|------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| CO              | 37%                          | -15%                                              | 47%                                                |
| CO <sub>2</sub> | 1%                           | -7%                                               | -7%                                                |
| NO <sub>x</sub> | 1%                           | -12%                                              | -40%                                               |

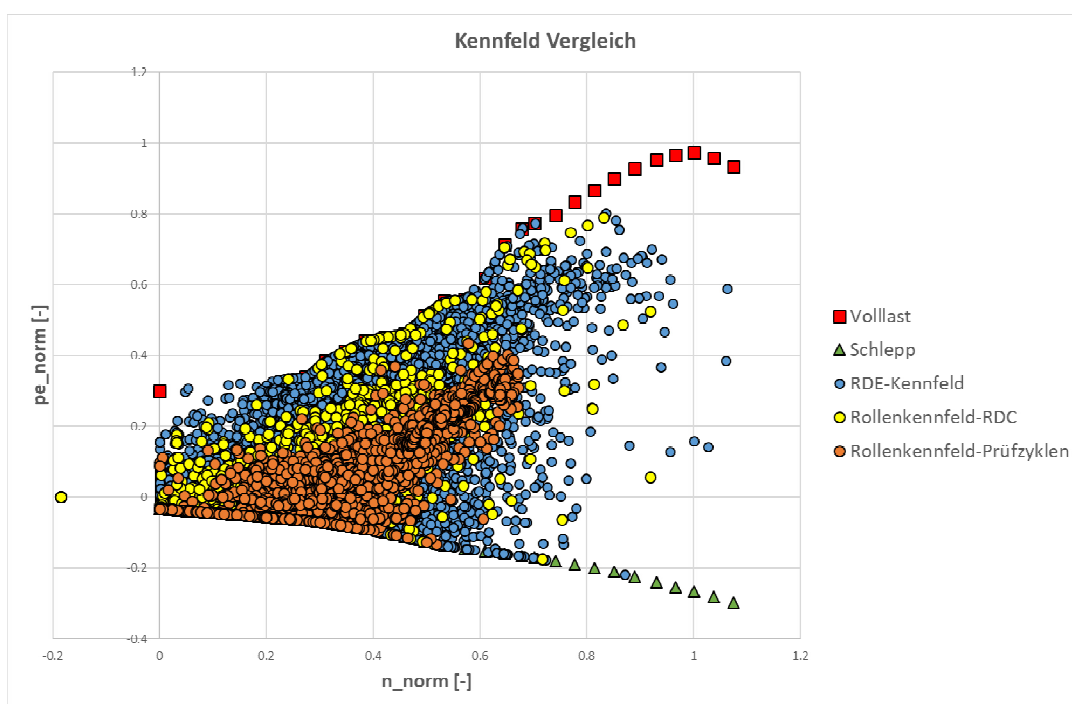
Beim Nachrechnen der jeweils anderen Messserie entstehen Abweichungen, die bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen 1% beim Nachsimulieren der Rollenmessung mit RDE-Kennfeld und -7% beim Nachsimulieren der RDE-Messung mit dem Rollenkennfeld betragen. Bei beiden CO bzw. NO<sub>x</sub> sind die Abweichungen 37% bzw. 1% bei der Simulation der Rollentests mit RDE Kennfeld und - 15% bzw. - 12% bei der Simulation der RDE Tests mit dem Kennfeld aus

den Rollentests für die Variante, bei der auch die RDC Zyklen zur Erzeugung des Kennfeldes verwendet wurden. Wird das Kennfeld nur aus CADC, ERMES und WMTC erzeugt, sind die Abweichungen mit 47% bzw. 40% deutlich größer. Die Verwendung der extra für Motorräder erstellten RDC Zyklen verbessert die Genauigkeit also deutlich.

Die Ursache für die Abweichungen liegen bei der Simulation der Rollentests daran, dass einzelne Spitzenwerte in der Simulation nicht richtig getroffen werden (Abbildung 53). Beim RDE-Test ergeben sich zusätzlich Abweichungen durch die geringere Kennfeldabdeckung der Rollenmessung, insbesondere, wenn die RDC Zyklen nicht für die Kennfelderstellung verwendet werden. Dadurch entstehen in der Simulation der RDE-Fahrt mit dem Rollenkennefeld Ungenauigkeiten durch extrapolierte Werte (siehe Abbildung 54).



**Abbildung 53: CO Verlauf im Rollentest (alle Rollenzyklen in Serie) aus Messung und aus Simulation mit unterschiedlichen Kennfeldern**



**Abbildung 54: Vergleich der Kennfeldabdeckung zwischen Rollen- und RDE-Test**

### 9.3. Bestimmung der Fahrwiderstände aus Realfahrten

Die Fahrwiderstände von 2-Rädern im realen Betrieb sind nicht gut bekannt. In Rollenmessungen werden masseabhängig die Widerstandskoeffizienten gemäß WMTC Norm eingestellt. Messungen im realen Betrieb werden nicht durchgeführt, wären für die Bestimmung von Emissionsfaktoren sowohl für die Rollentests als auch für die Längsdynamiksimulation mit PHEM allerdings wesentlich.

Neben der Kennfelderstellung wurde daher auch die Möglichkeit untersucht, die Fahrwiderstände der 2-Räder aus Realfahrten zu bestimmen. Dabei erfolgt die Ermittlung der Fahrwiderstände über eine Methode bei der eine gemessene Leistung einer PEMS-Fahrt, einer aus der Fahrzeuglängsdynamik berechneten gegenübergestellt wird.

Die grundsätzliche Methode zur Bestimmung von Roll- und Luftwiderstand ist:

- 1) Die Motorleistung in der RDE-Fahrt wird aus dem generischen Kennfeld aus gemessenem CO<sub>2</sub>-Verlauf und Drehzahl berechnet.
- 2) Verluste im Getriebe werden über einen durchschnittlichen Getriebewirkungsgrad abgezogen um die Radleistung zu erhalten
- 3) Die Radleistung muss gleich der Summe der Fahrwiderstände sein, wobei nur Roll- und Luftwiderstand unbekannt sind:

$$P_{rad} = v \times (F_{roll} + F_{luft} + F_{Steigung} + F_{Beschleunigung})$$

$$P_{Beschleunigung} = (m_{Fahrzeug} + m_{Beladung}) \times a \times v + P_{a_{rot}}$$

$$P_{Steigung} = (m_{Fahrzeug} + m_{Beladung}) \times g \times \frac{Steigung}{100}$$

Damit können  $F_{roll}$  und  $F_{luft}$  als einzige Unbekannte berechnet werden. Da der Rollwiderstand weitgehend geschwindigkeitsunabhängig und der Luftwiderstand mit dem Quadrat der Geschwindigkeit steigt, kann die Summe aus  $F_{roll}$  und  $F_{luft}$  auch in die beiden Anteile getrennt werden.

Für die Berechnung müssen die gemessene Motordrehzahl, die gefahrene Geschwindigkeit und die Steigung bekannt sein. Die Fahrzeuglängsbeschleunigung muss nicht als Messgröße vorliegen, sondern kann aus den Geschwindigkeitsdifferenzen berechnet werden. Die Fahrbahnsteigung kann einfach, aber mit Unsicherheiten, aus GPS Daten ermittelt werden. Die genaueste Methode zur Bestimmung der Steigungsdaten ist, den Verlauf der Straßenhöhe aus den gemessenen x- und y-Koordinaten aus einem Geländemodell zu interpolieren.

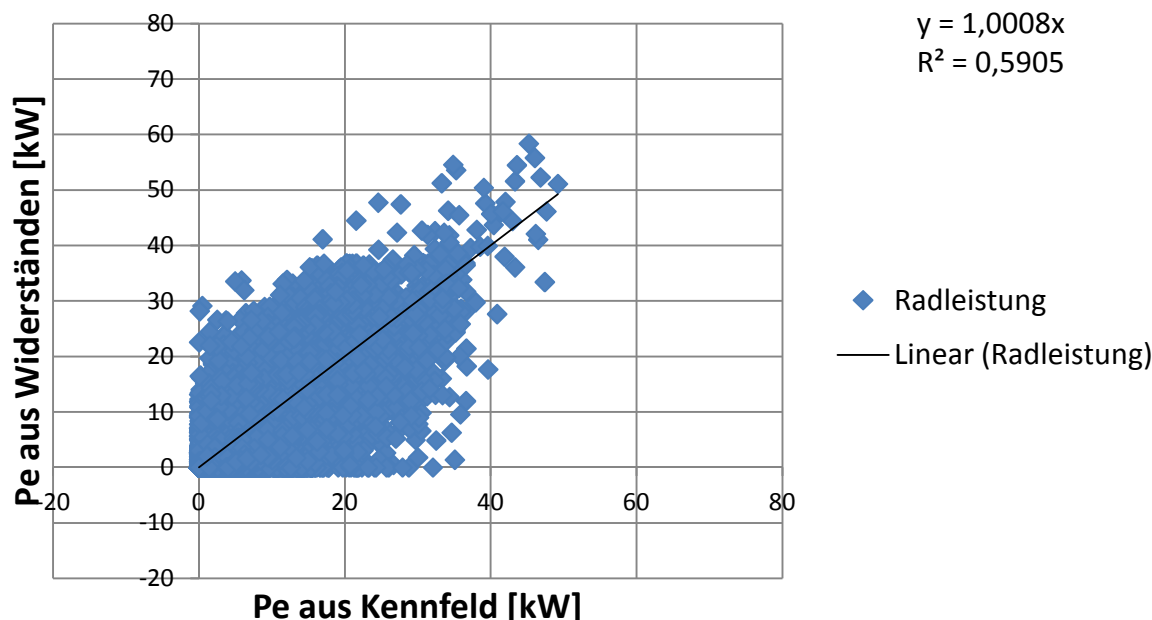
Die Berechnung von  $F_{roll}$  und  $F_{luft}$  kann dann auf unterschiedliche Weise erfolgen:

- Iterative Anpassung von berechneter und gemessener Summenleistung über Ausgleichsgerade.
- Vergleich der summierten geleisteten Arbeiten.
- Bestimmung der Widerstände in Bereichen konstanter Geschwindigkeiten.

Die Unsicherheiten in den Messgrößen (speziell Steigung aber vermutlich auch Beschleunigung aus den GPS-Daten), Windeinflüsse sowie Kurvenfahrt und Fahrbahnbeschaffenheit

und auch Einflüsse einer variablen Fahrerposition sind allerdings in Summe offensichtlich so hoch, dass sich keine eindeutige Lösung der Gleichung für  $F_{roll}$  und  $F_{luft}$  ergibt<sup>7</sup>.

Abbildung 55 zeigt das Ergebnis der Fahrwiderstandsbestimmung für die BMW F800GT, wobei der Luftwiderstand ( $C_w \times A$ ) so angepasst wurde, dass sich bei vorgegebenem Rollwiderstandsbeiwert insgesamt die mittels generischem CO<sub>2</sub>-Kennfeld berechnete Arbeit in den RDE-Fahrten ergibt.



**Abbildung 55: Vergleich der aus dem generischem CO<sub>2</sub>-Kennfeld berechneten Arbeit und der über Längsdynamik mit kalibriertem Luftwiderstandsbeiwert berechneten Arbeit in den PEMS Testfahrten für die die BMW F800GT**

Im Vergleich zu den Fahrwiderständen aus der WMTC-Einstellung, ergeben sich doch deutlich höhere Fahrwiderstände ( $C_w$  Wert von ca. 0,8 bei Querschnittsfläche von 1,2m<sup>2</sup>). Weitere Messungen an 2-Rädern im realen Betrieb wären also als Grundlage für reale Fahrwiderstände im HBEFA empfehlenswert.

**Tabelle 24: Vergleich der Fahrwiderstände aus WMTC-Bestimmung und aus RDE Messung für die die BMW F800GT**

|                                  | WMTC Norm | Aus RDE Tests |
|----------------------------------|-----------|---------------|
| Masse [kg]                       | 350       | 350           |
| $C_w \times A$ [m <sup>2</sup> ] | 0.5227    | 0.957         |
| Rollwiderstandsbeiwert [N/N]     | 0.0071647 | 0.008         |

Die Größenordnung der Fahrwiderstände lässt sich vermutlich am sichersten treffen, wenn der Reifen-Rollwiderstandskoeffizient konstant angenommen wird (je nach Reifenlabel) und

<sup>7</sup> Werden  $F_{roll}$  und  $F_{luft}$  über der Geschwindigkeit aufgetragen, ergibt sich eine Wolke anstelle des erwarteten, physikalisch sinnvollen Verlaufes gemäß einer quadratischen Funktion

der  $C_w$ -Wert angepasst wird, bis die integrierte Zyklusarbeit aus Längsdynamik mit der aus dem generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld übereinstimmt.

Welche Bestimmungsmethode die besten Ergebnisse liefert müsste mit weiteren Motorrädern getestet werden. Das Verfahren sollte aber weiterverfolgt werden, um Daten zu den realen Fahrwiderständen zu generieren.

#### 9.4. PHEM Schaltmodell

Der tatsächliche Gang wird in PHEM simuliert, falls keine Drehzahl oder Gangposition in der Eingabe des Fahrzyklus gegeben ist. Bei der Berechnung von Emissionsfaktoren in den HBEFA-Verkehrssituationen ist naturgemäß keine Ganginformation vorhanden.

Der Gang ist notwendig, um die tatsächliche Motordrehzahl zu berechnen und somit für die Interpolation der Schadstoffe aus dem Motorkennfeld wesentlich. Für PKW sowie leichte und schwere Nutzfahrzeuge sind bereits reale und verschiedene gesetzliche Gangschaltregeln in PHEM integriert.

Die Prüfzyklen NEDC, FTP und WLTP folgen den Regeln in den entsprechenden Vorschriften. Diese Regeln entsprechen allerdings nicht unbedingt einem durchschnittlichen, realen Gangschaltverhalten und führen somit zu Abweichungen in der Drehzahl gegenüber den Messwerten in anderen Zyklen als im entsprechenden Typprüfzyklus. Deswegen bietet PHEM ein real world Schaltmodell an, welches auch kalibriert werden kann, um automatisierte Getriebesysteme wie Doppelkupplungsgetriebe oder unterschiedliche Fahrerverhalten zu reproduzieren.

Das Schaltmodell nutzt zur Berechnung der Motordrehzahlen für Gangwechsel einen linearen Ansatz (Gleichung [3]) mit zwei Variablen ( $V_{norm}$ , AP10) und drei Konstanten (Koeffizienten A, B, C). Die Variablen  $V_{norm}$  und AP10 berücksichtigen den Einfluss der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit (normalisiert auf maximal Geschwindigkeit des Kfz) und Motorleistung (gleitender Durchschnitt über 5 Sekunden vor und nach dem aktuellen Zeitstempel). Zusätzlich beachtet das Schaltmodell viele weitere Bedingungen wie z.B. das Zurückschalten in einen niedrigeren Gang falls nicht genug Leistung verfügbar ist oder einen minimalen Zeitabstand zwischen zwei Schaltvorgängen.

$$\begin{aligned}
 nn_{up} &= A_{up} + B_{up} * V_{norm} + C_{up} * AP10 \\
 nn_{down} &= A_{down} + B_{down} * V_{norm} + C_{down} * AP10
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

|                |                                                                                                                                                                                        |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $nn_{up/down}$ | ... normalisierte Motordrehzahl für Auf/Ab-Schaltvorgänge (Normalisierung erfolgt durch die Division durch die Nenndrehzahl: $n_{norm} = (n / n_{rated})$ mit n als Drehzahl in 1/min) |
| $A_{up/down}$  | ... PHEM Kalibrierparameter                                                                                                                                                            |
| $B_{up/down}$  | ... PHEM Kalibrierparameter                                                                                                                                                            |
| $C_{up/down}$  | ... PHEM Kalibrierparameter                                                                                                                                                            |
| $V_{norm}$     | ... aktuelle normalisierte Fahrzeuggeschwindigkeit, berechnet mit $v_i / v_{max}$ in jeder Sekunde j                                                                                   |
| $v_{max}$      | ... Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs im höchsten Gang                                                                                                                               |
| AP10           | ... gemittelte Motorleistung -/+ 5s                                                                                                                                                    |

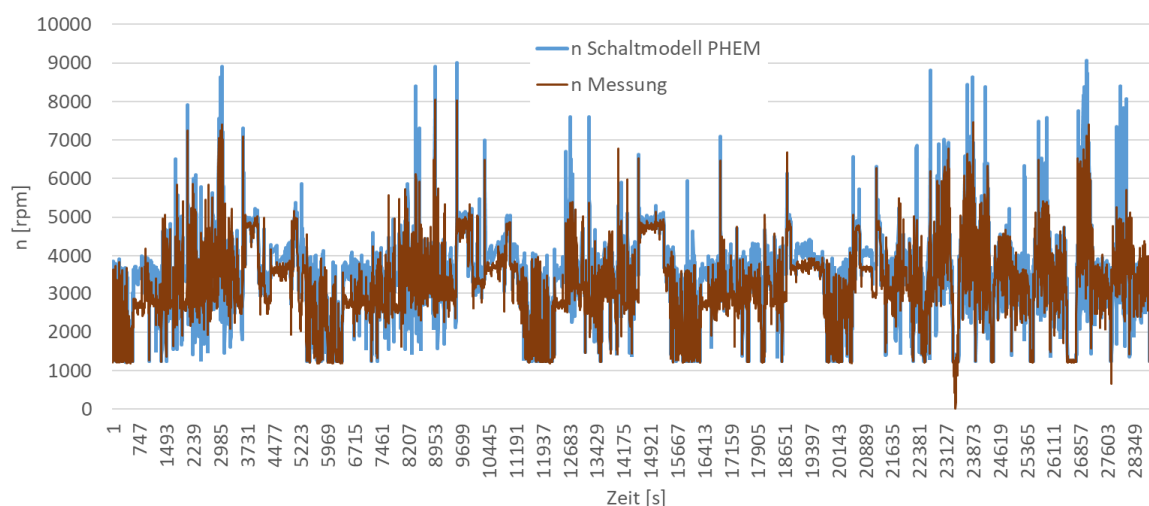
Die Standard Schaltparameter in PHEM für PKW sind:

**Tabelle 25: Schaltparameter für einen durchschnittliche PKW-Fahrer in PHEM**

| Koeffizient | Runterschalten | Hochschalten |
|-------------|----------------|--------------|
| A           | 0.18           | 0.30         |
| B           | 0.28           | 0.30         |
| C           | 0.46           | 0.40         |

### 9.4.1. Beurteilung der Qualität des PHEM-PKW-Schaltmodells für 2-Räder

Zur Beurteilung des PHEM-PKW-Schaltmodells für 2-Räder wurden die durchgeführten KTM-Messungen einmal mit vorgegebener Motordrehzahl berechnet und anschließend ohne Vorgabe, wodurch die Drehzahl über den simulierten Gang mit den durchschnittlichen PKW-Schaltparametern berechnet wird. Die Ergebnisse der beiden Simulationen sind in Abbildung 56 dargestellt.



**Abbildung 56: Vergleich von gemessener und simulierter Motordrehzahl mit dem Basisschaltprogramm von PHEM für die BMW F800GT in allen PEMS Tests**

Das zugrundeliegende PKW-Schaltmodell liefert bereits gute Simulationsergebnisse für 2-Räder (Abweichung der mittleren Drehzahl von Messung und Simulation liegt bei 7%), bietet allerdings noch Potential zur Verbesserung durch eine genauere Abstimmung. Vor einer Feinabstimmung sollten allerdings noch einige Real-World Messdaten gesammelt werden, um das Modell nicht nur anhand von 2 Motorrädern bzw. 2 Mofas für repräsentatives Fahrverhalten zu bedaten. Eine Anpassung der Schaltparameter an Rollenmessungen, wo normierte Gangwechsel gemäß WLTC vorgegeben sind, erscheint nicht sicher zielführend, da nicht sicher ist, wie repräsentativ diese normierten Schaltbedingungen für die Realität sind.

## 10. Ausarbeitung der Grundlagen für zukünftige Messkampagnen

Die folgende Abhandlung beschreibt die Empfehlungen für zukünftige Messkampagnen für Zweiräder in Bezug auf Emissionen und Kraftstoffverbrauch unter Einbezug von on-road Messungen (AP5: Ausarbeitung der Grundlagen für zukünftige Messkampagnen). Ziel ist es eine Beschreibung der Messtechnik und Messmethodik zu geben um Daten für die Bestim-



mung von Emissionsfaktoren zu generieren. Folgende Ausarbeitung basiert auf den oben dargestellten Untersuchungen zu realen Fahrverhalten mit mehreren Fahrzeugen, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden. Die folgenden Empfehlungen stellen eine mögliche Basis für weiterführende Tests dar und sind in diesem Sinne ein Leitfaden. Dieser gliedert sich in die Beschreibung von Klasseneinteilung für Fahrzeuge, Testzyklen und Messgrößen am Rollenprüfstand sowie Randbedingungen und Messgrößen für PEMS Tests. Weiteres werden Empfehlungen für eine günstige Aufteilung in Rollen- und PEMS-Tests gegeben, sowie die Anforderungen an das Datenformat für die weitere Verwendung der Messwerte zur Erstellung der Emissionsfaktoren beschrieben.

### 10.1. Auswahl der Fahrzeuge

Entsprechend den unterschiedlichen im Betrieb befindlichen Motortechnologien und dazugehörigen Kubaturen für die einzelnen Fahrzeugklassen ergibt sich eine Fahrzeuge- und Technologien-Matrix wie in Tabelle 26 schematisch dargestellt.

**Tabelle 26: Technologie Matrix für Zweiräder**

| Technologie     | Kubatur [ccm] |      |
|-----------------|---------------|------|
|                 | 50            | > 50 |
| 2 Takt Prinzip  |               |      |
| Schaltgetriebe  |               |      |
| Einspritzung    | x             | x    |
| Vergaserprinzip | x             | x    |
| CVT Getriebe    |               |      |
| Einspritzung    | x             | x    |
| Vergaserprinzip | x             | x    |
| 4 Takt Prinzip  |               |      |
| Schaltgetriebe  |               |      |
| Einspritzung    | x             | x    |
| Vergaserprinzip | x             | x    |
| CVT Getriebe    |               |      |
| Einspritzung    | x             | x    |
| Vergaserprinzip | x             | x    |

Entsprechend den unterschiedlichen Motor Technologien ergeben sich im Betrieb differierende Emissionen; dies zusätzlich pro Technologie Klasse auf Grund unterschiedlicher Entwicklungsstadien und unterschiedlicher Verwirklichung der jeweiligen Konzepte. Wie groß die Streuung in den Emissionen innerhalb einer Klasse ist, ist derzeit unbekannt, jedoch sicher so ausgeprägt, dass mehrere Kraftfahrzeuge je Klasse gemessen werden müssen, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Folglich ergibt sich die Empfehlung der Vermessung von Fahrzeugen auf Basis oben dargestellter Tabelle in Kombination mit der Zulassungsstatistik von Zweirädern je betrachteter Region. Beginnend mit den am häufigsten zugelassenen

Klassen ist es sinnvoll pro Technologie mindestens fünf Fahrzeuge entsprechend unten dargestellter Messmethodik zu vermessen. Weniger flottenrelevante Fahrzeugklassen/Technologie Kombinationen können vorerst stichprobenartig abgedeckt werden um sukzessive mehr Daten zu generieren.

## 10.2. Optimale Anteile PEMS und Rollentests in einer Messkampagne

Im Rahmen der Untersuchungen zur Entwicklung einer Messmethodik zur Generierung von Emissionsfaktoren für Zweiräder wurde auf einem BMW F800GT Motorrad ein handelsübliches PEMS in Kombination mit einem EFM nach Stand der Technik aufgebaut und in Betrieb genommen. Neben einer Vielzahl von Messungen im Realbetrieb auf öffentlicher Straße wurden Referenzmessungen auf der Zweiradrolle durchgeführt um die Messergebnisse zu evaluieren. Es ergaben sich jedoch bereits zu Beginn des Messaufbaus Herausforderungen in Bezug auf die Anordnung der einzelnen Komponenten für die Abgas- und Massenstrommessungen sowie in Bezug auf die später durchgeführten Messungen im Realbetrieb (siehe Kap. 7). Folgende Grafik veranschaulicht noch einmal den vollen Aufbau für on-road Messungen entsprechend der Verordnung Commission Regulation (EU) 2016/646 vom 20 April 2016, die für PKW-Anwendungen in Kraft ist.



**Abbildung 57: Beispielhafter Versuchsaufbau eines vollständigen PEMS auf einem BMW F800GT Motorrad**

Entsprechend dem Aufbau, der sich auf Grund der Entwicklung dieser PEMS für den PKW-Sektor ergibt, lassen sich folgende Herausforderungen für on-road Messungen mit Zweirädern zusammenfassen:

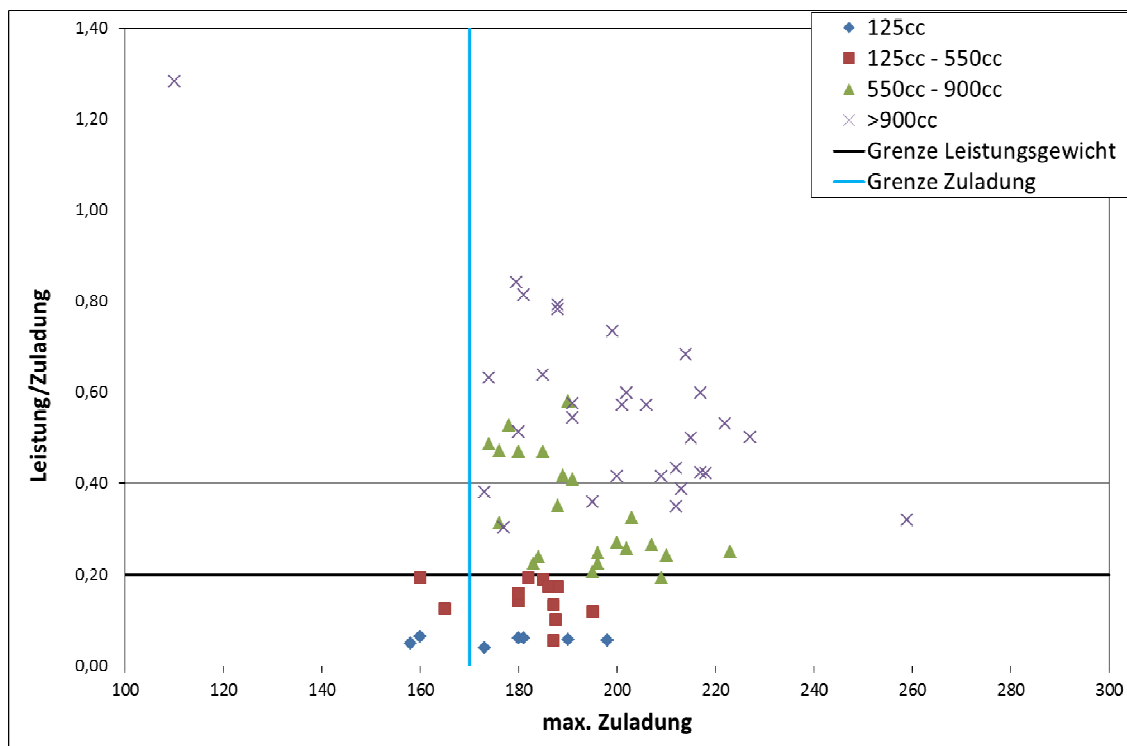
- Die Unterschreitung der höchst Zulässigen Nutzlast von Fahrer und Messaufbau ist gewährleistet und es besteht eine Reserve zur maximal möglichen Zuladung von zumindest 5%. Das PEMS System simuliert somit einen eher schweren Beifahrer.
- Die Leistungsklasse des Versuchsfahrzeuges ist entsprechend der Zuladung nicht zu gering, um nicht etwaige gefährliche Situationen im öffentlichen Straßenverkehr herbeizuführen.

- Die Leistungsklasse für PEMS Anwendungen soll nicht zu klein sein um reale Fahrsituationen entsprechend den üblichen Motorlasten wirklichkeitsgetreu abbilden zu können
- Der Messaufbau ist entsprechend der Achslastverteilung so angeordnet, dass sich keine gefährlichen Situationen im öffentlichen Straßenverkehr ergeben können. Als Beispiel wäre eine harte Beschleunigung oder ein abruptes Bremsmanöver zu nennen.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass das verwendete Versuchsfahrzeug BMW F800GT entsprechend dem hier gezeigten Messaufbau vermutlich die kleinste mögliche Klasse für eine on-road Emissionsmessung mit vollem Messumfang darstellt (etwa 80kg Zusatzgewicht durch Messgeräte). Dies aufgrund der zulässigen Zuladung inklusive Reserve und vor allem auf Grund des Handlings. Beispielsweise wurde beim Auf- und Absteigen assistiert und auch die Fahrdynamik wurde besonders beim sport-orientierten Fahren beeinflusst, allerdings noch immer im Rahmen aller oben genannten Randbedingungen, da dieses Motorrad auch für einen gleich schweren Sozius zugelassen wäre.

Es gibt Bemühungen von unterschiedlichsten Herstellern, die PEMS zu verkleinern, beziehungsweise durch angepasste Konzepte und Messprinzipien Bauraum einzusparen, wodurch in Zukunft diese Messungen an Zweirädern besser möglich sein werden. Darauf wird in Kapitel 11 explizit eingegangen. Es befinden sich PEMS für mittel bis schwach motorisierte Klassen von Zweirädern im Versuchsstadium. Auch im Rahmen des Projektes wurden Möglichkeiten getestet, ein leichtes PEMS basierend auf Sensoren darzustellen. Allerdings ist noch kein ausreichend kompaktes und leichtes PEMS in Serienstatus, mit dem kleinere Zweiräder sicher gemessen werden könnten.

Da speziell bei den größeren Motorrädern reale Fahrten nicht im vollen Leistungsspektrum am Rollenprüfstand gemessen werden können, und diese auch meist PEMS-kompatibel sind, ist es empfehlenswert, unter Bedacht oben angeführter Herausforderungen, zumindest bei ca. 10% der in nächster Zukunft zu vermessenden Fahrzeuge Emissionsmessungen auch im Realbetrieb durchzuführen. Dies um stichprobenartig mehr Erfahrungen zu gewinnen, eventuell die Entwicklung kompakter PEMS Systeme zu forcieren und um auf eine spätere Intensivierung des Messprogramms auf öffentlicher Straße mit einer breiten Datenbasis vorbereitet zu sein. Insbesondere können damit aber eventuelle Abweichungen zwischen Rollen- und Straßenergebnissen früh erkannt und entsprechende Konsequenzen im Testprogramm gezogen werden.



**Abbildung 58: Mindestanforderungen an Zuladung und Leistungsgewicht für PEMS-Messung**

Als zusätzliches Entscheidungskriterium mit welchem Kraftfahrzeug im Realbetrieb Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmessungen durchgeführt werden sollen, kann Abbildung 58 herangezogen werden. Als Auswahlkriterien wird das Leistungsgewicht (Leistung/Zuladung) über der maximalen Zuladung der möglichen Messfahrzeuge aufgetragen. Als erstes darf die Summe aus Fahrzeuggewicht, Fahrer und Messtechnik das höchstzulässige Gesamtgewicht abzüglich einer 5% Reserve nicht überschreiten. Zusätzlich sollen reale Fahrsituationen durch die Begrenzung des minimalen Leistungsgewichtes gewährleistet werden. Die Messfahrt mit einem 125cc Motorrad würde durch Beladung mit der ca. 80kg schweren Messtechnik die Volllastanteile deutlich verzerrt darstellen und somit keine repräsentativen Ergebnisse liefern<sup>8</sup>. Die zusätzliche Belastung ist für Motorräder der Kategorie >550cc noch immer deutlich höher als bei PKW allerdings ist die Leistung dieser Fahrzeugklasse im Allgemeinen so hoch, dass die Motorlastpunkte nicht mehr so gravierend zu höheren Lasten verschoben werden. Zusätzlich kommt eine Fahrt mit Sozius in dieser Klasse sehr viel häufiger vor als dies in Fahrzeugkategorien mit kleinerer Kubatur der Fall ist.

Empfohlen wird daher, dass nur Fahrzeuge mit einer maximalen Zuladung größer als 170kg und einem Leistungsgewicht (Leistung/max. Zuladung) von mindestens 0.2 kW/kg für Emissionsmessungen auf der Straße verwendet werden. Damit wird die Erfassung repräsentativer Emissionswerte im Realbetrieb ermöglicht.

Zusammenfassend wird empfohlen, dass für alle zu vermessenden Fahrzeuge die weiter unten beschriebenen Testprozeduren am Rollenprüfstand absolviert wird, und zusätzlich zu diesem Programm zumindest bei 10% der Fahrzeuge pro Klassen/Technologie Kombination

<sup>8</sup> Um für das Emissionsmodell PHEM passende Emissionskennfelder zu erzeugen, können solche Tests schon verwendet werden, solange auch Niederlastteile gefahren werden.

(bei 5 Fahrzeugen pro Kombination entspricht das zumindest einem Zweirad) Messfahrten im realen Betrieb durchgeführt werden. Des Weiteren wird angemerkt, dass pro Messreihe mit PEMS zumindest eine Referenzmessung auf der Zweiradrolle durchgeführt werden sollte. Dazu muss die mobile Messtechnik (PEMS, EFM, ...) wie bei Messungen im Realbetrieb auch auf der Zweiradrolle aufgebaut werden. Bei diesem Test soll ein Real Drive Cycle RDC (siehe Kapitel 7.1.4) vermessen werden. Damit soll eine korrekte Funktion der On-Board Messtechnik sichergestellt werden.

Zusätzlich sei an dieser Stelle auf den letzten Absatz von Kapitel 10.3.1 verwiesen, in welchem die Auswertung der RDC diskutiert wird. Die dargestellten Histogramme der Leistungsverteilung geben hier einen zusätzlichen Anhalt für die Beurteilung der Relevanz von zusätzlich nötigen Messfahrten unter Realbedingungen bei einem Fahrzeug.

### 10.3. Testzyklen und Messgrößen am Rollenprüfstand

Für die Emissionsmessungen auf der 2-Radrolle sollen sowohl die aktuellen Homologierungszyklen als auch neue Real-Drive-Zyklen gefahren und analysiert werden (siehe Kapitel 7.1.4). Je nach Fahrzeugkategorie ergibt sich daraus das Messprogramm. Die folgende Auflistung als auch Tabelle 27 geben einen Überblick über die je Fahrzeug zu messenden Zyklen. Unterschieden wird hier im wesentlichen in zwei Klassen,  $\leq 50\text{ccm}$  und  $> 50\text{ccm}$ . Das Messprogramm stellt sicher, dass alle für die Bedienung des Emissionsmodells PHEM nötigen Messwerte und Betriebspunkte verfügbar sind, die Messwerte direkt auch schon repräsentative Emissionsniveaus liefern und auch Kaltstart von Zweirädern in Zukunft nach HBEFA Methode auswertbar ist.

- $> 50\text{ccm}$ 
  - Typprüfzyklus
  - RDC1\_kalt – Zyklus mit Kaltstart
  - RDC2\_warm – Zyklus soll mit warmen Motor gestartet werden
  - Voll-Kaltstartzyklus-Motorrad<sup>9</sup>
    - ca. 5min lange Wiederholung eines charakteristischen Geschwindigkeitsverlaufes
    - zur Analyse der Kaltstartemissionen -  $\text{Emiss}_{\text{kalt}}/\text{Emiss}_{\text{warm}}$  über Zeit
- $< 50\text{ccm}$ 
  - Typprüfzyklus
  - RDM kalt – Zyklus mit Kaltstart
  - RDM warm – Zyklus soll mit warmen Motor gestartet werden
  - Voll-Kaltstartzyklus-Mofa
    - ca. 5min lange Wiederholung eines charakteristischen Geschwindigkeitsverlaufes
    - zur Analyse der Kaltstartemissionen -  $\text{Emiss}_{\text{kalt}}/\text{Emiss}_{\text{warm}}$  über Zeit
    - kann für Fahrzeuge mit Kaltstartstrategie zu lange sein

---

<sup>9</sup> Analog zum IUFC-Test bei PKW wird eine Geschwindigkeitssequenz mehrmals hintereinander wiederholt bis sich ein stabiles Emissionsniveau einstellt (= betriebswarmer Zustand). Damit können Kaltstartzusatzemissionen als Differenz zu diesem stabilen Emissionsniveau einfach berechnet werden.

**Tabelle 27: Messzyklen nach Fahrzeugkategorie**

| Testzyklen               | Kubatur [ccm] |     |           |           |       |
|--------------------------|---------------|-----|-----------|-----------|-------|
|                          | 50            | 125 | 125 – 550 | 550 – 900 | > 900 |
| WMTC                     |               | x   | x         | x         | x     |
| ECE R47                  | x             |     |           |           |       |
| RDC1_kalt                |               | x   | x         | x         | x     |
| RDC2_warm                |               | x   | x         | x         | x     |
| RD-Mofa                  | x             |     |           |           |       |
| Kaltstartzyklus-Motorrad |               | x   | x         | x         | x     |
| Kaltstartzyklus-Mofa     | x             |     |           |           |       |

Für all diese Emissionsmessungen auf der 2-Radrolle gelten die gleichen Anforderungen an die zu messenden Parameter (siehe Empfehlung in Tabelle 28). Die Emissionen sollen dabei mit einer offenen / geschlossenen CVS-Anlage abgesaugt und state of the art Analysatoren ausgewertet werden. Für ausgewählte Fahrzeuge müssen Referenzmessungen mit dem PEMS durchgeführt werden. Dazu sollen die PEMS-Parameter zusätzlich aufgezeichnet und ausgewertet werden.

**Tabelle 28: Messgrößen für Rollenprüfstandsuntersuchungen**

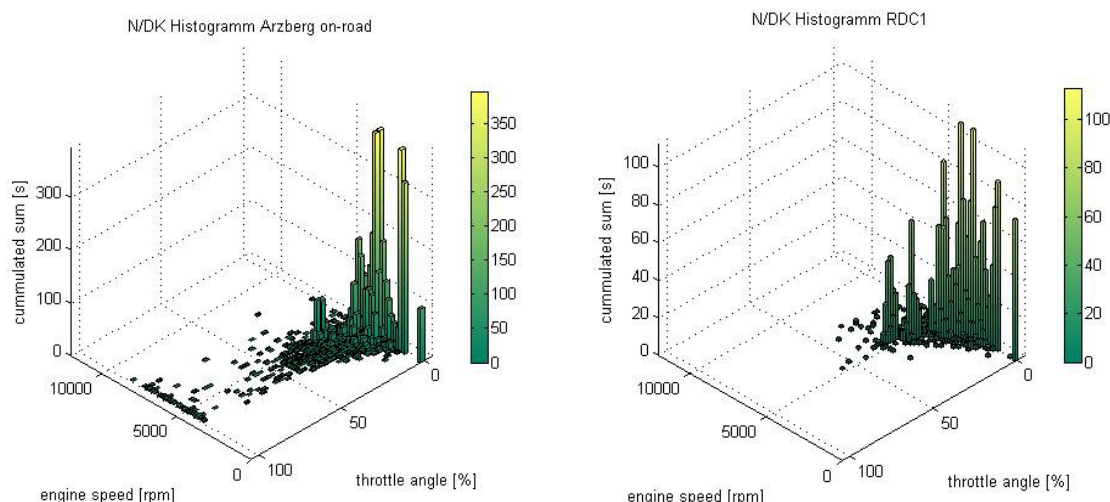
| Variable         | Bezeichnung                         | Einheit           | Quelle    | Häufigkeit             |
|------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------|------------------------|
| $t_{CVS}$        | Messzeit                            | s                 | Prüfstand | jede Messung           |
| $CO_2_{Rolle}$   | $CO_2$ Konzentration                | %                 | Prüfstand | jede Messung           |
| $CO_{Rolle}$     | CO Konzentration                    | ppm               | Prüfstand | jede Messung           |
| $NO_{Rolle}$     | NO Konzentration                    | ppm               | Prüfstand | jede Messung           |
| $NO_2_{Rolle}$   | $NO_2$ Konzentration                | ppm               | Prüfstand | jede Messung           |
| $O_2_{Rolle}$    | $O_2$ Konzentration                 | %                 | Prüfstand | jede Messung           |
| $v_{Rolle}$      | Geschwindigkeit der 2-Rad Rolle     | km/h              | Prüfstand | jede Messung           |
| T1               | Ansaugtemperatur                    | °C                | Prüfstand | Optional, jede Messung |
| T31              | Abgastemperatur vor Katalysator     | °C                | Prüfstand | Optional, jede Messung |
| T41              | Abgastemperatur nach Katalysator    | °C                | Prüfstand | Optional, jede Messung |
| n                | Motordrehzahl                       | 1/min             | CAN       | jede Messung           |
| $\alpha$         | Drosselklappenwinkel                | %                 | CAN       | Optional, jede Messung |
| i                | Aktueller Gang                      | -                 | CAN       | Optional, jede Messung |
| $\lambda_1$      | Lambda vor Katalysator              | -                 | CAN       | jede Messung           |
| $\lambda_2$      | Lambda nach Katalysator             | -                 | CAN       | Optional, jede Messung |
| $\dot{m}_{fuel}$ | Kraftstoffmassenstrom               | g/s               | z.B.: PLU | Optional, jede Messung |
| $t_{PEMS}$       | Messzeit                            | s                 | PEMS      | Nur Referenzmessung    |
| $CO_2_{PEMS}$    | $CO_2$ Konzentration (5°C dry)      | %                 | PEMS      | Nur Referenzmessung    |
| $CO_{PEMS}$      | CO Konzentration (5°C dry)          | ppm               | PEMS      | Nur Referenzmessung    |
| $NO_{PEMS}$      | NO Konzentration (25°C semidry)     | ppm               | PEMS      | Nur Referenzmessung    |
| $NO_2_{PEMS}$    | $NO_2$ Konzentration (25°C semidry) | ppm               | PEMS      | Nur Referenzmessung    |
| $O_2_{PEMS}$     | $O_2$ Konzentration (5°C dry)       | %                 | PEMS      | Nur Referenzmessung    |
| $T_{GAS}$        | Gastemperatur bei Entnahmestelle    | °C                | PEMS      | Nur Referenzmessung    |
| $\dot{V}$        | EFM Abgasvolumenstrom               | m <sup>3</sup> /s | EFM       | Nur Referenzmessung    |
| $\dot{m}$        | EFM Abgasmassenstrom                | kg/h              | EFM       | Nur Referenzmessung    |
| $T_{EFM}$        | EFM Gastemperatur                   | °C                | EFM       | Nur Referenzmessung    |



Nicht angeführt werden an dieser Stelle die nicht limitierten Emissionskomponenten, da zu diesem Zeitpunkt mit den zur Verfügung stehenden Daten keine genaue Liste aller relevanten Emissionen erstellt werden kann, ohne die Vollständigkeit derselben gewährleisten zu können. Grundsätzlich kann ein Anhalt in Kapitel 8.4 gefunden werden. Aus heutiger Sicht sollten bei Messungen der nicht limitierten Komponenten mittels FTIR alle vom System erfassten Komponenten aufgezeichnet und zumindest diejenigen ausgewertet werden, deren Konzentration über dem Messrauschen liegt.

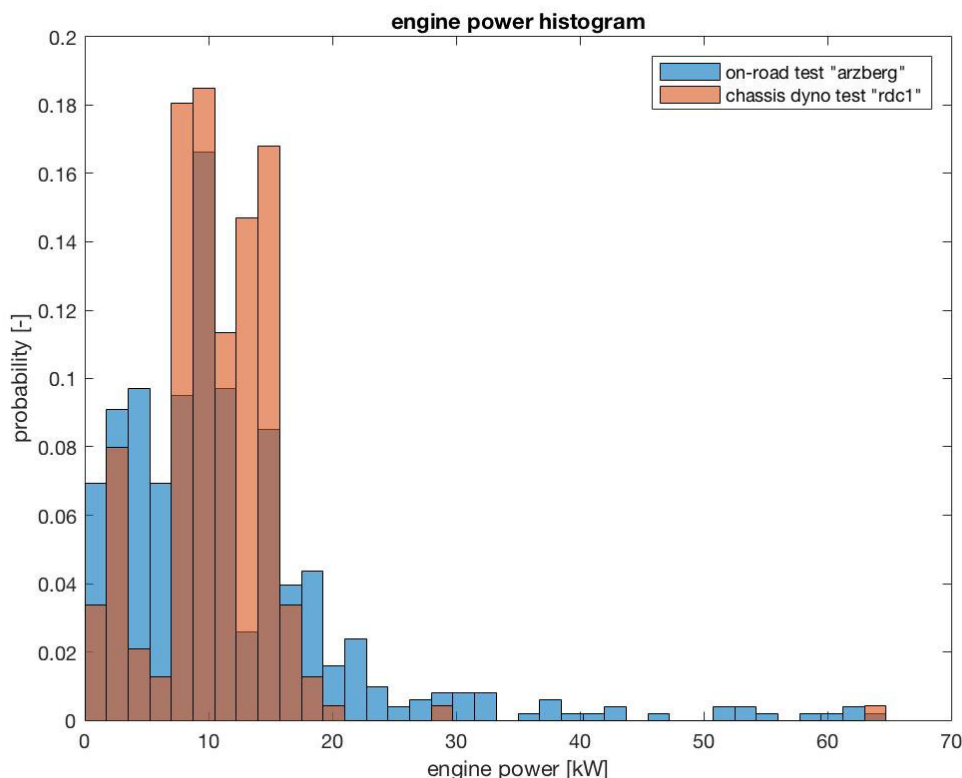
### 10.3.1. Real Drive Test Cycles und on-road Referenzmessungen

Für die in Kapitel 10.3 vorgeschlagenen Testprozeduren sollen die in Kapitel 7.1.4 hergeleiteten und vorgestellten Real Drive Test Cycles und Vollkaltstartzyklen verwendet werden. Um Erfahrungen aus realen Fahrscenarien abgeleiteten Testzyklen zur Anwendbarkeit als Rollentests zu gewinnen, wird die Auswertung diverser motorspezifischer Daten aus zukünftigen real world Straßenmessungen in Histogramm-Form empfohlen. Beispielsweise zeigt nachstehende Grafik den Vergleich der Zeitanteile über Drosselklappenstellung und Drehzahl einer Realfahrt (links) mit Stadt-, Überland- und Autobahnanteil, und der Prüfstands Messung des RDC1 (rechts) für ein Motorrad. Statt Drosselklappenstellung kann – je nach Verfügbarkeit - auch Moment oder Motorleistung zum Vergleich verwendet werden.



**Abbildung 59: Histogramme der Zeitanteile Drosselklappenstellung und Drehzahl**

Die Darstellungen verdeutlichen die Anwendbarkeit und Realitätsnähe des RDC1 für dieses bestimmte Motorrad. An dieser Stelle können Rückschlüsse zu Kapitel 10.2 geschlossen werden um eventuell mit einem Motorrad, dessen ausgewertete Zeitklassierung eines RDC vom Realbetrieb entsprechend differiert, weiter Tests durchzuführen bzw. später die hier ausgearbeiteten RDC und RDM Zyklen an umfangreichere Real World Fahrdaten anzupassen, falls öfters unzureichende Kennfeldabdeckungen durch die Rollenzklen festzustellen sind.



**Abbildung 60: Leistungshistogramme für on-road Testzyklus "Arzberg" und RDC1**

Weiters lassen sich dieselben Fahrten in einem Leistungsdiagramm, wie in Abbildung 60 dargestellt, vergleichen. Hier ist auf Grund der Abdeckung des Leistungshistogramms, weniger aber auf Grund der Ähnlichkeit der Verteilungen, zu erkennen, dass für vorliegendes Fahrzeug der RDC1 die Leistungsbereiche eines realitätskonformes Fahrens abbildet.

Diese Darstellungsformen sind als erster Vorschlag für die Überprüfung der Realitätsnähe von Real Drive Cycles zu verstehen und sollen in weiterer Folge verfeinert und vor allem erweitert werden um tieferes Verständnis für die Thematik erarbeiten zu können. Derartige Untersuchungen könnten durchgeführt werden, wenn über die nächsten Jahre weitere Real World Messdaten erzeugt und gesammelt werden. Dafür bietet sich die ERMES Gruppe an, wenn sich mehrere Mitgliedsländer beteiligen und das vorgeschlagene Messprogramm an mehreren Zweirädern umsetzen.

#### 10.4. Randbedingungen und Messgrößen für on-road Tests

Die Einsetzbarkeit von PEMS ist entsprechend Kapitel 10.2 zu entscheiden. Die Empfehlung für Messungen im realen Fahrbetrieb ist eine Kombination aus innerstädtischem Anteil, Überlandanteil und Autobahnanteil in einem prozentuellen Verhältnis der Strecken von 30%, 45% und 25%. Dabei wird empfohlen, dass der Überlandanteil ein Teilsegment mit sportorientiertem Fahren auf kurvenreicher und wenn möglich hügeliger oder ansteigender Strecke beinhaltet um der teilweisen Verwendung von Motorrädern als Freizeit- und Sportgerät Rechnung zu tragen (vergleiche dazu Kapitel 7.1.3). Grundsätzlich soll „möglichst übliches Fahren im echten Verkehr“ praktiziert werden wobei gleichzeitig eine Verallgemeinerung der Messungen durch mehrere Fahrer- und Fahrverhalten-Kombinationen angestrebt werden

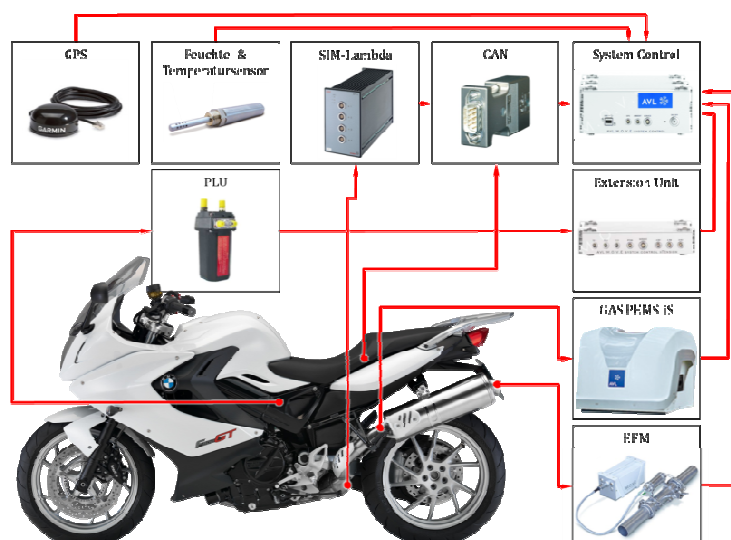
soll. Dabei kann pro Fahrer das Fahrverhalten, je nach Fahrsituation angepasst, nach subjektiver Empfindung als „cruise“, „normal“ oder „ambitioniert“ angepasst werden.

#### 10.4.1. Aufbau eines PEMS auf Zweirädern

Da es mittlerweile eine Vielzahl an verfügbaren PEMS gibt ist der Aufbau desgleichen auf Zweirädern grundsätzlich entsprechend den Maßen und Befestigungsmöglichkeiten der zu montierenden Messgeräte anzupassen. Um alle nötigen Messgrößen, wie in Kapitel 10.4.2 beschrieben, aufzeichnen zu können, sind zumindest folgende Messgeräte notwendig. Abbildung 61 veranschaulicht die folgende Liste.

- GPS Modul mit Feuchte- & Temperatursensor für Umgebungsbedingungen
- Lambdameter für Lambda-Messungen (vorzugsweise vor und nach KAT)
- CAN-Schnittstelle zum Loggen von CAN-Größen
- Volumenstrommessgerät mit Dichtesensor zur Messung des Kraftstoffverbrauchs (kann alternativ aus CO<sub>2</sub>-Messung und C-Bilanz berechnet werden)
- Exhaust Flow Meter EFM zur Messung des Abgasmassenstroms (kann alternativ aus gemessenem Kraftstoffverbrauch und Lambda berechnet werden, sofern Kfz nicht im Schubetrieb ist).
- PEMS zur Messung der Abgaskomponenten
- Entsprechende Kontrolleinheit zum Speichern der Daten

Bei unten dargestelltem Messaufbau auf einem BMW F800GT Motorrad war zur Befestigung des PEMS ein zusätzlicher Aluminiumrahmen notwendig, der über dem Sitzplatz des Sozius mit Querverbindungen zum Motorradrahmen und den Fußrasten des Sozius angebracht war. Des Weiteren wurden die seitlichen Gepäckskoffer zum Verstauen von weiteren Messgeräten und Zusatzbatterien verwendet.



**Abbildung 61: Beispielhafte Auflistung zu verwendender Messgeräte für vollständige Straßenmessungen im Realbetrieb**

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass der Aufbau eines PEMS nach Maßgabe der Verkehrssicherheit zu gestalten ist. Dies kann sich auf Grund ausladender Messgeräte oder speziell nötiger Anordnungen der gleichen schwierig gestalten, ist aber zwingend einzuhalten.



**Abbildung 62: Vollständiger Aufbau eines PEMS auf einem BMW F800GT Motorrad**

Die Entnahmeposition für die Abgasanalyse ist grundsätzlich nach den Bestimmungen des Herstellers des PEMS zu wählen. Bei hier beschriebenem Motorrad wäre dies nach dem EFM und vor einer weiteren Beruhigungsstrecke vorgesehen, was auf Grund der Verkehrssicherheit nicht möglich war. Aus diesem Grund wurde die Entnahmeposition vor dem Endschalldämpfer gewählt und es wurden die Messwerte des Massenstroms entsprechend korrigiert. In Kapitel 0 wurde diesbezüglich bereits auf die Verwendung eines hoch genauen Messgerätes zur Messung des Kraftstoffverbrauches hingewiesen. In Kombination mit einer hoch aufgelösten und sehr schnellen Messung des Luftverhältnisses Lambda könnte in Zukunft die Abgasmassenstrommessung umgangen werden. Auch ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Messung von beispielsweise Einspritzmenge, Luftmasse, Motordrehzahl, usw. wenn möglich durch Steuergerätparameter abgeglichen oder ersetzt werden kann.

Querempfindlichkeiten der einzelnen Messgeräte sind in jedem Fall zu vermeiden, zu überprüfen und gegebenenfalls auszuweisen und im Post Processing rechnerisch auszugleichen.

#### **10.4.2. Messgrößen für on-road Messungen mit PEMS**

Die zu messenden Größen für on-road Messungen mit PEMS entsprechen im Wesentlichen Tabelle 28. Zusätzlich sind GPS Daten der Testfahrten zu loggen. Weiters wird empfohlen die Vorder- und Hinterradgeschwindigkeiten aufzuzeichnen um Auswertungen des Schlupfes zu ermöglichen. Die zu ergänzenden Messgrößen sind in Tabelle 29 aufgelistet.

**Tabelle 29:** Ergänzende Messgrößen zuzüglich zu Tabelle 28 für on-road Messungen mit PEMS

| Variable         | Bezeichnung              | Einheit | Quelle | Häufigkeit   |
|------------------|--------------------------|---------|--------|--------------|
| V <sub>HR</sub>  | Hinterradgeschwindigkeit | km/h    | CAN    | jede Messung |
| V <sub>VR</sub>  | Vorderradgeschwindigkeit | km/h    | CAN    | jede Messung |
| V <sub>GPS</sub> | Fahrzeuggeschwindigkeit  | km/h    | GPS    | jede Messung |
| h <sub>GPS</sub> | geodätische Höhe         | m       | GPS    | jede Messung |

## 10.5. Datenauswertung zur Berechnung der Emissionsfaktoren

Mit dem in Kapitel 10.4.1 beschriebenen Messaufbau und der in Kapitel 10.3 aufgezeichneten Messgrößen können alle weiteren Größen zur Berechnung der HBEFA Emissionsfaktoren abgeleitet werden. Die Datenaufzeichnung sollte für eine ausreichende Genauigkeit der Auswertung zumindest eine Rate von 1[Hz] aufweisen. Zur Berechnung der Emissionsfaktoren sind die in Tabelle 30 dargestellten Parameter notwendig.

**Tabelle 30: Notwendige Parameter zur Berechnung der Emissionsfaktoren aus PEMS Tests**

| Variable                                      | Bezeichnung                                                                     | Einheit |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------|
| $t_{\text{mess}}$                             | Messzeit                                                                        | s       |
| $v_{\text{Fahrzeug}}$                         | Fahrzeuggeschwindigkeit                                                         | km/h    |
| $k_{\text{Steigung}} / h_{\text{geodätisch}}$ | Steigung / geodätische Höhe (zur Validierung der berechneten Emissionsfaktoren) | % / m   |
| $m_{\text{AG}}$                               | Abgasmassenstrom                                                                | kg/s    |
| $n_{\text{Motor}}$                            | Motordrehzahl                                                                   | 1/min   |
| $DK_{\text{Motor}}$                           | Drosselklappenstellung (optional)                                               | %       |
| $P_{\text{Motor}}$                            | Motorleistung (optional)                                                        | W       |
| $\text{CO}_2$                                 | Massenemissionen Kohlendioxid                                                   | g/s     |
| $\text{CO}$                                   | Massenemissionen Kohlenmonoxid                                                  | g/s     |
| $\text{NO}_2$                                 | Massenemissionen Stickstoffdioxid                                               | g/s     |
| $\text{NO}$                                   | Massenemissionen Stickstoffmonoxid                                              | g/s     |
| $\text{NO}_x$                                 | Summe der Stickoxide                                                            | g/s     |
| $\text{HC}$                                   | Summe der Kohlenwasserstoffe (optional)                                         | g/s     |
|                                               | Partikel (optional)                                                             |         |
|                                               | Weitere nach Verfügbarkeit                                                      |         |

## 11. Untersuchung bezüglich eines mobil einsetzbaren Abgas-Messsystems für Zweiräder

Wie zuvor beschrieben, setzen die Abmessungen und das Gewicht der verfügbaren PEMS Systeme der Anwendbarkeit bei Zweirädern enge Grenzen. Ausnahme wäre derzeit eventuell das PEMS System von MAHA<sup>10</sup>, das relativ kompakt in einem Koffer untergebracht ist. Dieses stand allerdings für die hier durchgeführten Versuche nicht zur Verfügung.

Ziel der Untersuchungen und Recherchen war die Machbarkeit eines einfachen und mobil einsetzbaren Abgasmesssystems für motorisierte Zweiräder zu verifizieren. Dazu müssten idealerweise die Konzentrationen der Komponenten  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{THC}$  und  $\text{NO}_x$  bei einer Straßenfahrt messbar sein und auch der Abgasmassenstrom ermittelt werden, um sodann die Emissionen in [g/h] zu erhalten. Die derzeit am Markt befindlichen portablen Messsysteme für PKW sind aufgrund ihres hohen Gewichts von ca. 60 kg und ihren Dimensionen nicht für motorisierte Zweiräder im Bereich von 125 bis 650 cm<sup>3</sup> geeignet. Mögliche Systeme sollten vom Platzbedarf inklusive der benötigten Stromversorgung (Akkumulatoren) beispielsweise in einem Tankrucksack transportierbar sein. Einrichtungen zur Bestimmung des Abgasmas-

<sup>10</sup> <http://www.maha-ajp.de/Produkte/Abgas-Messtechnik/Mobile-Abgasmessung-PEMS> am 01.10.2017

senstromes wiederum dürfen auch weder zu voluminös und zu lang sein, noch sollen sie die Schwingungen im Auspuffsystem die z.B. charakteristisch für die Abstimmung von Zweitaktmotoren sind, beeinflussen.

In die Recherche und den teilweisen Test mit einigen Komponenten am Prüfstand wurden die folgenden Systeme aufgenommen.

### 11.1. Sensorbasiertes System

Sensoren zur Bestimmung einiger Abgaskomponenten werden schon seit einiger Zeit bei PKW und Nutzfahrzeugen im Bereich der On-Board Diagnose oder zur Steuerung und Regelung von Abgasnachbehandlungen eingesetzt. Dazu zählen vor allem die Breitbandlambdasonde und der NO<sub>x</sub>-Sensor. Beide basieren im Prinzip auf einer sauerstoffleitfähigen und temperaturfesten Keramik, in dem einen Fall wird der Sauerstoffgehalt des Abgases direkt ermittelt und als Lambdawert ausgegeben, im anderen Fall wird NO und NO<sub>2</sub> katalytisch in O<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> zerlegt und die dabei entstandenen Sauerstoffmenge bestimmt, die somit ein Maß für die NO<sub>x</sub>-Konzentration im Abgas darstellt. Beide Sensoren haben ungefähr dieselbe Größe und lassen sich direkt in den Abgasstrang einschrauben.

Der NO<sub>x</sub>-Sensor kann derzeit NO<sub>x</sub>-Konzentrationen bis 1500 ppm erfassen. Der Messwert wird über ein Interface als numerischer Wert auf einen CAN-Bus ausgegeben. Eine Breitbandlambdasonde kann den Bereich von Lambda = 0,7 – ∞ abdecken, und liefert in diesem Bereich ein kontinuierliches Stromsignal, das ebenfalls über ein Interface weiterverarbeitet werden kann.

Abseits von diesen in Serie verbauten Sensoren ergab die Recherche keine sofort einsatzfähigen Sensoren die weiteren Gaskomponenten CO<sub>2</sub>, CO und THC direkt abdecken würden und für die hohen Temperaturen im Abgas geeignet wären. Es gibt in der Gasmesstechnik zwar zahlreiche Sensoren auf der Basis von Lichtabsorption (meist Infrarotabsorption) die selektiv messen, es wurde aber keiner ausfindig gemacht der für Abgas und insbesondere für die hohen Temperaturen im Abgas hätte eingesetzt werden können.

Abgesehen von den in der Automobilindustrie eingesetzten Abgassensoren existieren in der Feuerungstechnik noch Sensoren auf Feststoffelektrolytbasis die vor allem unverbrannte Abgasbestandteile im Verbrennungsgas als Summe detektieren sollen und zur Verbrennungsteuerung in diesen Feuerungsanlagen dienen sollen. Einer dieser Sensoren wurde ausgesucht und auf die Tauglichkeit im Abgas eine Summe aus CO und den anderen unverbrannten Kraftstoffbestandteilen zu detektieren, untersucht.

#### Untersuchtes System:

- Breitbandlambdasonde (Fa. BOSCH)
- NO<sub>x</sub>-Sensor (Fa.Continental)
- Kombisonde KS1D (Fa.LAMTEC)<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> LAMTEC: Systemübersicht-LT3-KS1D

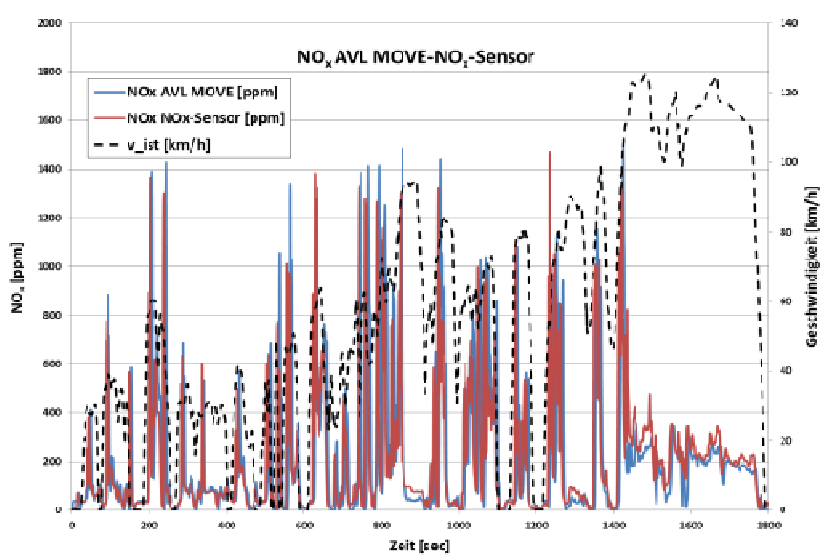




**Abbildung 63: Sensoranordnung im Abgasrohr**

Dabei sollte die Kombisonde KS1D daraufhin untersucht werden, ob es mit ihr möglich wäre, die Summenkonzentration aus CO und HC im Motorenabgas zu bestimmen. Da die Sonde allerdings bei ihrem Einsatz in Feuerungen hauptsächlich überstöchiometrisch und stationär betrieben wird, war ihr dynamisches Verhalten bei  $\lambda=1$  oder leicht fettem Abgas nicht bekannt. Während sich bei Stationärpunkten das Ausgangssignal der Sonde ebenfalls noch annähernd stationär verhielt, war eine Zuordnung des Ausgangssignals zur Summenkonzentration aus CO und HC gemessen mit einem NDIR-Analysator im Rohabgas nicht unmittelbar möglich. Da weitere Untersuchungen mit der Kombisonde keinen kurzfristigen Erfolg versprochen, wurde dieses Konzept nicht weiterverfolgt.

Relativ etabliert in der sensorbasierten Abgasmessung ist jedoch der ebenfalls eingesetzte  $\text{NO}_x$ -Sensor. Abbildung 64 zeigt einen Vergleich der  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen gemessen mit dem  $\text{NO}_x$ -Sensor und AVL MOVE (dem PEMS-System für PKW). Der  $\text{NO}_x$ -Sensor kann jedoch im Unterschied zu einem Analysator nur bei Abgastemperaturen eingesetzt werden die über dem Abgastaupunkt liegen. Nach Überschreiten des Abgastaupunktes wird erst der Aufheizzyklus des Sensors gestartet und danach sind dann gültige Messwerte vorhanden.



**Konzentrationsmittelwerte über Zyklus:**

| $\text{NO}_x$ :       | ppm    |
|-----------------------|--------|
| AVL MOVE              | 202.07 |
| $\text{NO}_x$ -Sensor | 201.99 |

**Abbildung 64: Vergleich der  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen gemessen mit einem  $\text{NO}_x$ -Sensor und AVL MOVE im WMTC-Zyklus**



## 11.2. Analysatorbasiertes System

Im Bereich der Abgasmesstechnik für Werkstätten bzw. für die mobile Diagnose an Fahrzeugen werden auch Analysatoren basierend auf nichtdispersiver Infrarotabsorption (NDIR) eingesetzt, die nicht nur, so wie es bei der stationären Abgasmesstechnik auf Prüfständen üblich ist, CO<sub>2</sub> und CO mit zwei getrennten NDIR-Messzellen erfassen, sondern CO<sub>2</sub>, CO und THC mithilfe nur einer einzigen Messzelle. Ein solches System wurde auch in einem Vergleich auf der Zweirad-Rolle untersucht.

### Untersuchtes System:

- AVL DiTest Gas 1000

Dieses System besteht, wie o.a., aus einer NDIR-Analysatorzelle für CO<sub>2</sub>, CO und HC und zwei Sensoren für O<sub>2</sub> und NO auf elektrochemischer Basis. Abbildung 65 zeigt die technischen Daten.

|                       |                                                                                                                               |            |                                                                                            |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| CO:                   | 0 ... 15 % vol                                                                                                                | 0.01 % vol | < 0,6 % vol: ± 0.03 % vol<br>≥ 0,6 % vol: ± 5 % v. M.                                      |
| CO <sub>2</sub> :     | 0 ... 20 % vol                                                                                                                | 0.01 % vol | < 10 % vol: ± 0.5 % vol<br>≥ 10 % vol: ± 5 % v. M.                                         |
| HC:                   | 0 ... 30000 ppm vol                                                                                                           | 1 ppm vol  | < 200 ppm vol: ± 10 ppm vol<br>≥ 200 ppm vol: ± 5 % v. M.<br>≥ 10000 ppm vol: ± 10 % v. M. |
| O <sub>2</sub> :      | 0 ... 25 % vol                                                                                                                | 0.01 % vol | < 2 % vol: ± 0.1 % vol<br>≥ 2 % vol: ± 5 % v. M.                                           |
| NO:                   | 0 ... 5000 ppm vol                                                                                                            | 1 ppm vol  | < 500 ppm vol: ± 50 ppm vol<br>≥ 500 ppm vol: ± 10 % v. M.                                 |
| Lambda:               | 0 ... 9.999                                                                                                                   | 0.001      | errechnet aus CO, CO <sub>2</sub> , HC, O <sub>2</sub>                                     |
| <b>Versorgung:</b>    |                                                                                                                               |            |                                                                                            |
| Spannungsversorgung:  | 15 ... 24 V DC                                                                                                                |            |                                                                                            |
| Leistungsaufnahme:    | ca. 20 W                                                                                                                      |            |                                                                                            |
| <b>Verschiedenes:</b> |                                                                                                                               |            |                                                                                            |
| Aufwärmzeit:          | ca. 2 min                                                                                                                     |            |                                                                                            |
| Anschluss CAL. GAS:   | 60 ... 140 l/h, max. Überdruck 450 hPa!                                                                                       |            |                                                                                            |
| Anschluss Gas In:     | ca. 180 l/h, max. Überdruck 450 hPa!                                                                                          |            |                                                                                            |
| Reaktionszeit:        | t <sub>95</sub> ≤ 10 s<br>(t <sub>95</sub> : innerhalb der Zeit t <sub>95</sub> müssen 95% der Gaskonzentration erkannt sein) |            |                                                                                            |
| Betriebstemperatur:   | 5 ... 45 °C                                                                                                                   |            |                                                                                            |
| Lagertemperatur:      | 0 ... 50 °C                                                                                                                   |            |                                                                                            |
| Relative Luftfeuchte: | ≤ 95 %, nicht kondensierend                                                                                                   |            |                                                                                            |
| Neigung:              | 0° oder 90° (GAS IN nach oben gerichtet)                                                                                      |            |                                                                                            |
| Abmessungen(BxTxH):   | 270 x 320 x 85 mm                                                                                                             |            |                                                                                            |
| Gewicht:              | 2.5 kg netto ohne Zubehör                                                                                                     |            |                                                                                            |
| Schnittstellen:       | USB                                                                                                                           |            |                                                                                            |

**Abbildung 65: Technische Daten AVL DiTEST GAS 1000<sup>12</sup>**

Im Rahmen der Messungen auf dem Zweirad-Rollenprüfstand wurde das AVL DiTest mit einem für PKW RDE-Messungen vorgesehenen AVL MOVE bei einer Rohabgasmessung verglichen. Der im Gerät eingebaute NO-Sensor wurde dabei außer Acht gelassen, da in einem möglichen Gesamtsystem für die mobile Abgasmessung an einem Zweirad für die NO<sub>x</sub>-Messung ein NO<sub>x</sub>-Sensor eingesetzt werden könnte, der ein wesentlich besseres zeitliches Ansprechverhalten hätte als der eingebaute NO-Sensor. Bei HC war in dem Fall kein direkter Vergleich möglich, da im PEMS System AVL MOVE kein HC-Analysator vorhanden ist und somit kein HC im Rohabgas gemessen wurde.

<sup>12</sup> AVL DiTEST: Benutzerhandbuch AVL DiTEST GAS 1000 AT7651D Rev.05, S.37

Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigen den Vergleich der Konzentrationen von CO<sub>2</sub> und CO gemessen im Rohabgas mit dem AVL DiTest und dem PEMS System AVL MOVE.

Die Messung von CO und CO<sub>2</sub> mit dem NDIR des AVL DiTest wäre mit etwas eingeschränkter Genauigkeit möglich.

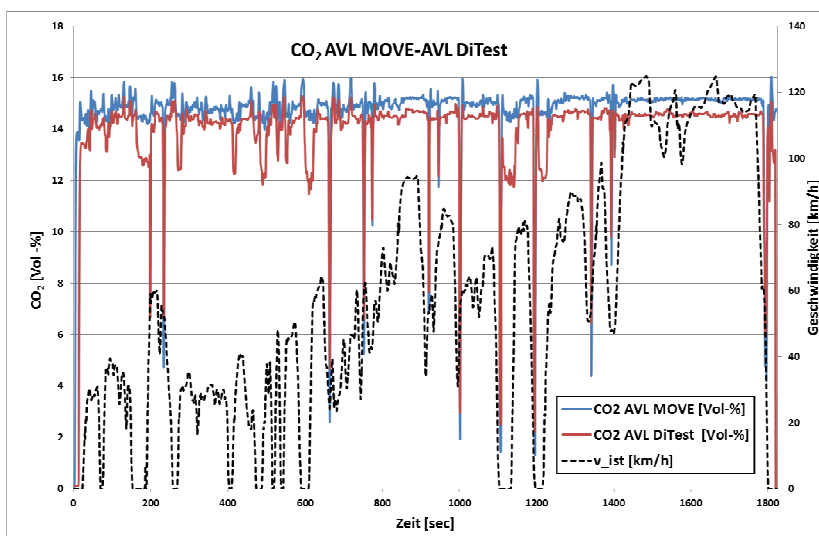


Abbildung 66: Vergleich CO<sub>2</sub> im WMTC-Zyklus

Konzentrationsmittelwerte über Zyklus:

| CO <sub>2</sub> : | Vol-% |
|-------------------|-------|
| AVL MOVE          | 14.7  |
| AVL DiTest        | 13.7  |

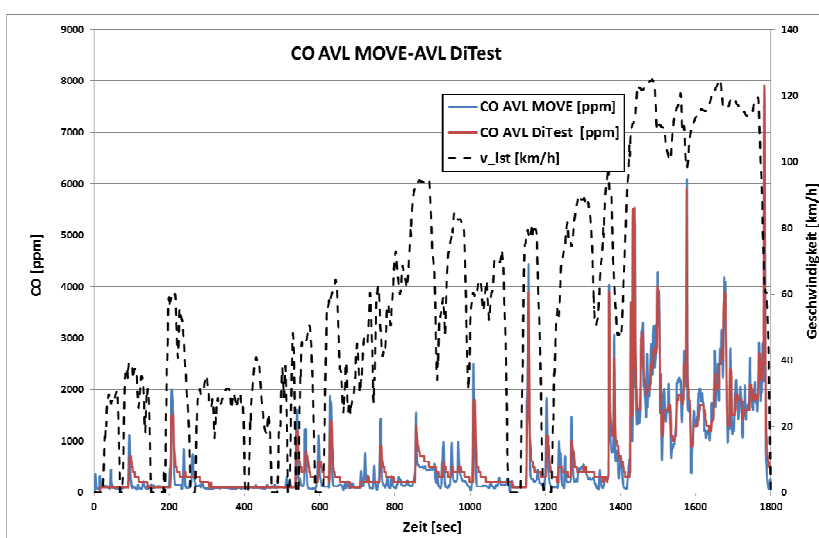


Abbildung 67: Vergleich CO im WMTC-Zyklus

Konzentrationsmittelwerte über Zyklus:

| CO:        | ppm    |
|------------|--------|
| AVL MOVE   | 612.13 |
| AVL DiTest | 665.10 |

### 11.2.1. Abgasmassenstrommessung

Zur Bestimmung der Emissionen in [g/h] ist neben der Konzentrationsmessung auch eine Abgasmassenstrommessung am Fahrzeug notwendig. Für die portable Messung an PKW im Rahmen der RDE-Gesetzgebung werden derzeit durchwegs Systeme mit Volumenstrommessung nach dem Pitot-Rohr Prinzip verwendet. D.h. es wird die Strömungsgeschwindigkeit des Abgases über die Messung des statischen und dynamischen Drucks in der Abgasströmung bestimmt und mit der Abgastemperatur der Abgasmassenstrom errechnet. Die derzeit serienmäßig für PKW verwendeten Systeme gehen herunter bis zu einem Durchmesser von 2“ und einen Massenstrom von 15 bis 570 kg/h (bei 100°C Abgastemperatur).

Ein solches System hat inklusive der Beruhigungstrecken eine Länge von ungefähr 90 cm und wiegt mit der Steuereinheit ca. 6 kg ohne Stromversorgung. Trotz der vielen in der Literatur aufscheinenden Bemühungen der Messtechnik ein alternatives Messverfahren für die Abgasmassenstrommessung zu entwickeln (z.B. auf Ultraschall- oder thermischer Basis) hat die diesbezügliche Recherche noch kein Verfahren ergeben das jetzt schon praktikabel für den Einsatz bei kleinen und mittleren Zweirädern wäre.

Wie schon in Kap. 10.4 beschrieben, kann als Alternative der Kraftstoffdurchfluss über ein Messgerät erfasst werden und der Abgasmassenstrom dann aus gemessenem Luftverhältnis und Kraftstoffmasse berechnet werden. Da im Schubbetrieb keine Kraftstoffmasse fließt und Lambda damit unendlich wird, versagt das Verfahren in diesen Fahrsituationen. Wegen der dort i.a. geringen Emissionen, könnte für Schub ein drehzahlabhängiger Default Wert hinterlegt werden. Allerdings ist der Einbau eines Kraftstoff-Messgerätes in die Kraftstoffleitungen aufwendig, so dass diese Variante keine sehr attraktive Lösung ist.

Die Versuche ein einfaches und leichtes On-Board Messsystem für Zweiräder aufzubauen legen also insgesamt nahe, eher bestehende PEMS Systeme bei größeren Motorrädern zu verwenden und die abzusehende Entwicklung in Richtung kleinerer Abmessungen abzuwarten anstelle ein eigenes System bis zur vollen Praxistauglichkeit aufzubauen.

### 11.3. Zusammenfassung

Es wurden umfangreiche Messungen an 5 Zweirädern zum Fahrverhalten im realen Betrieb durchgeführt. Die Fahrverhaltensuntersuchungen waren so angelegt, dass gezielt Strecken durchfahren wurden, die den HBEFA Verkehrssituationen entsprechen um eine Basis für zukünftige repräsentative Zweirad Fahrzyklen für das HBEFA zu schaffen. Aus diesen Zyklen wurden jeweils Teilstücke extrahiert und zu Real World Rollentestzyklen zusammengefügt. Die Teilstücke wurden entsprechend der kinematischen Kennzahlen ausgewählt.

Die Real World Rollentestzyklen wurden mit vier Zweirädern (2 Motorräder und 2 Mofas) am Rollenprüfstand vermessen, wobei für Mofas und Motorräder verschiedene Real World Zyklen erzeugt wurden (RDCs bzw. RDMs).

Die Messergebnisse wurden als Eingang für die Simulation mit dem Modell PHEM verwendet. Dabei zeigten RDCs und RDMs wie gewünscht eine gute Abdeckung des relevanten Bereichs im Motorkennfeld. Mit einem Motorrad wurden auch On-Board Emissionstests (PEMS Tests) im realen verkehr durchgeführt. Dabei wurde auch besonders sportliches Fahren im Test eingebaut. Die dabei angefahrenen Kennfeldbereiche sind im RDC1-Rollenzyklus als Teilstück mit 7% Fahrbahnsteigung enthalten. Schwächer motorisierte Motorräder sind speziell in dieser Passage am Rollenprüfstand schon an der Leistungsgrenze. Inwieweit dies dem realen, sportlichen Fahren solcher Motorräder entspricht ist noch offen, da die am Markt befindlichen PEMS Systeme für die Verwendung bei Zweirädern wegen des Gewichtes und der Baugröße generell schlecht geeignet sind. Auch das EFM zur Abgasmassenstrommessung ist von der Dimension her kritisch. PEMS Messungen sind damit nur bei größeren Motorrädern im realen Verkehr fahrbar.

Die Versuche ein einfaches und leichtes On-Board Messsystem für Zweiräder aufzubauen zeigten, dass für die Abgasmassenstrommessung keine attraktive Alternative besteht. Lambda und NO<sub>x</sub> können über leichte Sensoren gut erfasst werden, CO und CO<sub>2</sub> mit Genauigkeitseinschränkungen über NDIR Analysatoren, wie sie in Werkstätten-Testgeräten verwendet werden. Für HC wurde keine ausreichend genaue Option gefunden. Das Ergebnis legt also insgesamt nahe, eher bestehende PEMS Systeme bei größeren Motorrädern zu

verwenden und die abzusehende Entwicklung in Richtung kleinerer Abmessungen abzuwarten anstelle ein eigenes System bis zur vollen Praxistauglichkeit aufzubauen.

Durch den neu entwickelten Ansatz zur Leistungsberechnung über gemessene CO<sub>2</sub> Werte aus generischen, am stationären Motorprüfstand gemessenen Kennfeldern ist es nun möglich auch On-Board-Emissionstests mit tragbaren Emissionsmesssystemen (PEMS) mit PHEM auszuwerten, auch wenn kein Motordrehmoment während der Messung aufgezeichnet wurde. Diese Methode der Berechnung wurde bei den in diesem Forschungsvorhaben gemessenen Motorrad und Mofa-Messungen auch bei den Rollenmessungen angewendet. Dabei lagen insgesamt zwei stationär gemessene Motorkennfelder vor. Eines für ein Motorrad (BMW F800GT) und eines für ein Mofa (CTI). Diese können als generische Kennfelder für die Leistungsberechnung ähnlicher Zweiräder verwendet werden. Ein Verfahren zur Kalibrierung der generischen Kennfelder für spezifische Kfz wurde entwickelt und hier erfolgreich angewendet.

Aus den durchgeführten RDE und Rollenmessungen der Motorräder und Mofas wurden auch Motorkennfelder für die Schadstoffemissionen generiert. Diese enthalten die aufgezeichneten Emissionskomponenten des PEMS und der CVS (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC sowie optional auch die vom FTIR gemessenen Komponenten). Die nicht limitierten Abgaskomponenten aus der FTIR Messung können, wegen der teilweise sehr niederen Emissionsniveaus nur unsicher zeitaufgelöst gemessen und simuliert werden, so dass hier die Verwendung von Zyklusmittelwerten in [g/km] oder von mittleren Prozentwerten an den simulierten HC und NO<sub>x</sub> Emissionen empfohlen wird. Für die wesentlichen, mit FTIR aufgezeichneten nicht limitierten Abgaskomponenten (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, HCHO, Benzol, NH<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) wurden daher mittlere Emissionswerte und prozentuelle Anteile an HC und NO<sub>x</sub> gebildet.

Die erstellten Kennfelder erzeugen beim Nachsimulieren der jeweiligen Messungen Simulationsgenauigkeiten (Verbrauch <10%, Emissionen meist unter 20% mit Einzelfällen bis 40%) welche im Rahmen der PHEM Berechnungsgenauigkeiten von PKW liegen. Eine separate Berücksichtigung der Katalysatorkonvertierung würde einen deutlich höheren Mess- und Simulationsaufwand erfordern und erscheint daher nicht nötig zu sein. Das Simulieren von RDE-Messungen mit Kennfeldern erstellt aus Rollenmessungen zeigt ebenfalls eine gute Genauigkeit, welche allerdings stark von der erreichten Kennfeldabdeckung abhängt. Ist diese zu gering ergeben sich deutlich größere Abweichungen, da in nicht abgedeckten Kennfeldbereichen Extrapolationen stattfinden. Aus diesem Grund sollte bei Rollenmessungen auf eine gute Kennfeldabdeckung geachtet werden und neben den Prüfzyklen auch real drive Zyklen auf der Rolle gemessen werden.

Die in PHEM für PKW und Nutzfahrzeuge verwendeten Methoden zeigen sich insgesamt also auch für Zweiräder als gut anwendbar.

Neben der Erstellung der Emissionskennfelder wurde ebenfalls eine Methode zur Bestimmung der Fahrwiderstände aus RDE-Messungen untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Ermittlung von mittleren Fahrwiderständen möglich ist, die Streuung der Ergebnisse allerdings recht groß ist, da diese abhängig von der Fahrweise, Sitzposition, Seitenwind, Kurvenfahrt, Fahrbahnbeschaffenheit und Steigungsbestimmung ist. Allerdings sind das reale Einflüsse, die bei der Ermittlung von Emissionsfaktoren relevant sind.

Die Untersuchung des in PHEM integrierten Schaltmodells ergab, dass sie bereits gute Ergebnisse für 2-Räder erzielt, allerdings eventuell noch Potential für Verbesserungen aufweist. Die entsprechenden Modellparameter in PHEM sollten also mit weiteren Messungen zur Abbildung durchschnittlicher Moped- und Motorradfahrer kalibriert werden.

Aus den Erfahrungen aus Messung und Simulation wurde ein Messprogramm für zukünftige Real World Emissionstests als Basis für die Ausarbeitung von Emissionsfaktoren von Zweirädern erarbeitet. Neben den gesetzlichen Zyklen zur Feststellung ob das Kfz typgenehmigungskonform ist, wird die Messung der neu erarbeiteten Rollen-Real World Zyklen für Zweiräder vorgeschlagen (RDC1 und/oder RDC2 bzw. RDM für Mofas). Zusätzlich wird ein Kaltstarttest empfohlen, der die Bestimmung von Kaltstart-Zusatzemissionen, wie bei PKW im HBEFA üblich, erlaubt. PEMS Messungen scheinen mit derzeitigen PEMS Systemen nur bei größeren Zweirädern möglich zu sein. PEMS Tests an einem Teil der Stichprobe sind aber empfehlenswert um Erfahrungen und Anforderungen für den Einsatz bei Zweirädern zu sammeln und auch um Real World Daten zu Fahr- und Schaltverhalten zu generieren. Daten zum realen Betrieb sind sowohl für zukünftige Updates von Messprogrammen als auch der Simulationsparameter relevant. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Messungen können wegen der kleinen Stichprobe noch nicht unbedingt als repräsentativ für die Flotte angesehen werden.

Repräsentative Datensätze könnten erarbeitet werden, wenn über die nächsten Jahre weitere Real World Messdaten erzeugt und gesammelt werden. Dafür bietet sich die ERMES Gruppe an, wenn sich mehrere Mitgliedsländer beteiligen und das vorgeschlagene Messprogramm an mehreren Zweirädern umsetzen.

## 12. Literatur

- EC, 2016: COMMISSION REGULATION (EU) 2016/646 of 20 April 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6)
- Hausberger S., Rexeis M., Luz R., New Emission Factors for EURO 5 & 6 Vehicles, 19th International Conference „Transport and Air Pollution“, 26. – 27.11.2012, Thessaloniki
- Hausberger S., Rexeis M., Luz R., PHEM das Modell der TU Graz zur Berechnung von Kfz-Emissionen und seine Datenbasis bei Euro 5 und Euro 6, Fachtagung Emissionen und Minderungspotenziale im Verkehrsbereich, Stuttgart, 21.07.2011
- Hausberger S.: Simulation of Real World Vehicle Exhaust Emissions; VKM-THD Mitteilungen; Heft/Volume 82; Verlag der Technischen Universität Graz; ISBN 3-901351-74-4; Graz 2003
- Luz R., Hausberger S.: User Guide for the Model PHEM, Version 11.2; Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics TU Graz, Graz, 2013
- Rexeis M.: Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles. Dissertation, Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology. October 2009
- Zallinger M.: Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen. Dissertation, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz, April 2010



### 13. Tabellenverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Versuchsfahrzeuge zur Untersuchung von Fahrdynamik und Emissionen.....                                                                                                                                   | 11 |
| Tabelle 2: Übersicht aller Messungen, durchgeführt im Rahmen des BAST Projektes.....                                                                                                                                | 18 |
| Tabelle 3: Messmatrix der vermessenen Real World Testsegmente mit Charakterisierung und Verkehrssituationen nach HBEFA.....                                                                                         | 22 |
| Tabelle 4: Steigung A und Normalabstand B der Grenzgeraden der Dynamikparameter .                                                                                                                                   | 26 |
| Tabelle 5: Auswertung der Emissionen für einen WMTC (Stage 2 3-2) für eine BMW F800 GT mit 350kg Gesamtmasse. ....                                                                                                  | 36 |
| Tabelle 6: Auswertung der Emissionen für einen WMTC (Stage 2 3-2) für einen BMW F800 GT mit 270kg Gesamtmasse. ....                                                                                                 | 36 |
| Tabelle 7: Vergleich von Emissionen und Kraftstoffverbrauch bei Messungen eines WMTC mit unterschiedlichen Fahrern mit einer BMW F800 GT.....                                                                       | 38 |
| Tabelle 8: Vergleich von Emissionen und Kraftstoffverbrauch mit und ohne EFM.....                                                                                                                                   | 38 |
| Tabelle 9: Vergleich eines speziellen Dynamikfaktors für sport-orientierte und bergige Straßensegmente. ....                                                                                                        | 42 |
| Tabelle 10: Bewertungskriterien und Bewertung der Wichtigkeit der messtechnischen Erfassung von nichtlimitierten Emissionskomponenten am Rollenprüfstand. ....                                                      | 47 |
| Tabelle 11: Bewertung der schädlichen Wirkung auf Mensch und Umwelt ausgewählter Messkomponenten des FTIR. ....                                                                                                     | 48 |
| Tabelle 12: Für die Simulation verfügbare Messungen .....                                                                                                                                                           | 57 |
| Tabelle 13: Genutzte Komponenten der Messungen für PHEM Kennfelderstellung .....                                                                                                                                    | 59 |
| Tabelle 14: Genutzte Motorkennfelder und Messungen zur Summenkennfelderstellung .                                                                                                                                   | 59 |
| Tabelle 15: Vergleich von Messung und Simulation der KTM bei Nutzung des Summenkennfelds ohne Kalibrierung des generischen CO <sub>2</sub> -Motorkennfeldes.....                                                    | 60 |
| Tabelle 16: Abweichung von Simulation zur Messung für die KTM Duke bei der Nutzung des Summenkennfelds ohne RDE Messungen mit Kalibrierung des generischen CO <sub>2</sub> -Motorkennfeldes .....                   | 62 |
| Tabelle 17: Abweichung von Simulation zur Messung für die KTM Duke bei der Nutzung des Summenkennfelds mit RDC Messungen mit Kalibrierung des generischen CO <sub>2</sub> -Motorkennfeldes .....                    | 63 |
| Tabelle 18: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für die Gesamtmessungen (alle Rollen- und PEMS Test seriell simuliert mit Kennfeld aus allen Tests, ohne Zyklen mit Messartefakten).....            | 65 |
| Tabelle 19: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für die Gesamtmessungen (alle Rollen- und PEMS Test seriell simuliert mit Kennfeld aus den RDC bzw. RDM Tests, ohne Zyklen mit Messartefakten)..... | 67 |
| Tabelle 20: Prozentuelle Anteile (Mittelwert über beide Testfahrzeuge) der Roller von nicht limitierten Emissionskomponenten an HC und NO <sub>x</sub> .....                                                        | 70 |
| Tabelle 21: Prozentuelle Anteile (Mittelwert über beide Testfahrzeuge) der Motorräder von nicht limitierten Emissionskomponenten an HC und NO <sub>x</sub> .....                                                    | 70 |
| Tabelle 22 Abweichung zwischen Simulation und Messung für die Straßenfahrten mit der BMW F800GT mit dem aus den Realfahrten erstellten Kennfeld .....                                                               | 71 |



|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 23: Abweichungen zwischen Simulation und Messung mit Rollen- bzw. RDE Kennfeld für die BMW F800GT ..... | 71 |
| Tabelle 24: Vergleich der Fahrwiderstände aus WMTC-Bestimmung und aus RDE Messung für die die BMW F800GT .....  | 74 |
| Tabelle 25: Schaltparameter für einen durchschnittliche PKW-Fahrer in PHEM.....                                 | 76 |
| Tabelle 26: Technologie Matrix für Zweiräder .....                                                              | 77 |
| Tabelle 27: Messzyklen nach Fahrzeugkategorie .....                                                             | 82 |
| Tabelle 28: Messgrößen für Rollenprüfstandsuntersuchungen .....                                                 | 82 |
| Tabelle 29: Ergänzende Messgrößen zuzüglich zu Tabelle 28 für on-road Messungen mit PEMS .....                  | 86 |
| Tabelle 30: Notwendige Parameter zur Berechnung der Emissionsfaktoren aus PEMS Tests.....                       | 87 |

## 14. Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Messaufbau eines vollständigen PEMS auf einem BMW F800 GT Motorrad. ....                                                                                                                                                 | 14 |
| Abbildung 2: Detailansicht des EFM als Teil eines PEMS an einem BMW F800 GT Motorrad. ....                                                                                                                                            | 14 |
| Abbildung 3: Schematische Darstellung des vollständigen Messaufbaus am Rollenprüfstand.....                                                                                                                                           | 15 |
| Abbildung 4: Messaufbau am Rollenprüfstand mit PEMS, FTIR, PLUtron und CVS Anlage inklusive Abgas-Analysator. ....                                                                                                                    | 16 |
| Abbildung 5: Einbindung des EFM am Rollenprüfstand mit normgerechter Beruhigungsstrecke und Abgasentnahmestellen und weiteren Messanschlüssen. ....                                                                                   | 17 |
| Abbildung 6: Emissions- und Fahrdynamik-Messungen mit einem BMW F800 GT Motorrad. ....                                                                                                                                                | 19 |
| Abbildung 7: GPS-Logger mit zusätzlichen Anschlüssen für Drehzahlmessung und weitere analoge Eingänge auf einem BMW G650 GS Motorrad.....                                                                                             | 20 |
| Abbildung 8: Straßensegmente für die Bestimmung der Dynamik von Motorrädern im Realbetrieb (© OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA, bearbeitet in Microsoft PowerPoint)). ....                                                     | 23 |
| Abbildung 9: Etablierte und verwendete RDE Strecken des PKW für Referenzmessungen. (© OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA, bearbeitet in Microsoft PowerPoint). ...                                                               | 23 |
| Abbildung 10: Gemessene Dynamikparameter-Verteilung in Überlandfahrten mit allen Motorrädern im Vergleich zu Messungen mit einem PKW (Audi Q7) und dem WMTC.....                                                                      | 24 |
| Abbildung 11: Schematische Darstellung der Gültigkeit einer Real World Messfahrt. ....                                                                                                                                                | 25 |
| Abbildung 12: Darstellung der vorgeschlagenen Grenzen für Dynamikparameter bei Zweirädern für On-Board Emissionsmessungen im Rahmen des HBEFA.....                                                                                    | 26 |
| Abbildung 13: Darstellung der durchschnittlichen Dynamikparameter der einzelnen Testsegmente in den Verkehrssituationen nach HBEFA (vgl Tabelle 3) sowie Limits der Dynamikparameter für PKW für gültige RDE Tests zum Vergleich..... | 27 |

|                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 14: Schematische Darstellung des Programms zur Erstellung von Real World Testzyklen aus Einzelmessungen von Straßensegmenten nach HBEFA.....                                           | 29 |
| Abbildung 15: Schematische Darstellung der Methode zum Erstellen von realen Übergängen zwischen den verwendeten Einzelsegmenten zum Zusammenfügen eines synthetischen Real World Testzyklus..... | 29 |
| Abbildung 16: Real Drive Cycle 1 (RDC1) inklusive sport-orientiertem Abschnitt.....                                                                                                              | 30 |
| Abbildung 17: Real Drive Cycle 2 (RDC2).....                                                                                                                                                     | 30 |
| Abbildung 18: Voll-Kaltstartzyklus Motorrad.....                                                                                                                                                 | 30 |
| Abbildung 19: Real Drive Cycle Moped (RDM) .....                                                                                                                                                 | 31 |
| Abbildung 20: Voll-Kaltstartzyklus Mofa .....                                                                                                                                                    | 31 |
| Abbildung 21: 2-Rad Rollenprüfstand FVT mbH (rechts schematisch).....                                                                                                                            | 32 |
| Abbildung 22: Drehzahl/Drosselklappe-Klassierung mit (links) und ohne (rechts) vollständigem PEMS für ein BMW F800 GT Motorrad im Realbetrieb.....                                               | 34 |
| Abbildung 23: Motorkennfelder mit hinterlegtem Kraftstoffverbrauch für einen WMTC bei 350kg (links) und 270kg Gesamtmasse (rechts) am Rollenprüfstand mit einem BMW F800 GT Motorrad. ....       | 35 |
| Abbildung 24: Drehzahl/Drosselklappen-Klassierung für die Messung eines WMTC mit 350kg (links) und 270kg Gesamtmasse (rechts) am Rollenprüfstand mit der BMW F800 GT .....                       | 35 |
| Abbildung 25: Dynamikparameter der Messungen für HBEFA im Stadtgebiet. ....                                                                                                                      | 39 |
| Abbildung 26: Dynamikparameter der Messungen für HBEFA im Überland.....                                                                                                                          | 40 |
| Abbildung 27: Dynamikparameter der Messungen für HBEFA auf Autobahnen.....                                                                                                                       | 40 |
| Abbildung 28: Ausgewählte Einzelmessungen von Überland-Segmenten und deren Darstellung im Motorkennfeld eines BMW F800 GT Motorrads.....                                                         | 41 |
| Abbildung 29: Vergleich der Kennfeldabdeckung zwischen RDE Fahrten, RDC Rollenmessungen und legislativem Prüfzyklus aus der PHEM Simulation (siehe dazu Abbildung 54).....                       | 41 |
| Abbildung 30: Darstellung der Höhenprofils der RDE Strecke "Arzberg" mit markierten bergigen Straßensegment "Rechberg".....                                                                      | 42 |
| Abbildung 31: Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen der BMW-F800GT für verschiedene Rollenzyklen .....                                                                                       | 43 |
| Abbildung 32: Vergleich der limitierten Emissionen der BMW F800GT für verschiedene Zyklen.....                                                                                                   | 44 |
| Abbildung 33: Vergleich der limitierten Emissionen der KTM 125-Duke für verschiedene Zyklen.....                                                                                                 | 44 |
| Abbildung 34: Vergleich der limitierten Emissionen der Honda Zoomer für verschiedene Zyklen.....                                                                                                 | 45 |
| Abbildung 35: Vergleich der limitierten Emissionen des Peugeot Speedfight für verschiedene Zyklen.....                                                                                           | 46 |
| Abbildung 36: Mittlere Konzentrationen ausgewählter nicht limitierter Emissionskomponenten aus den Messungen der 3 Zweiräder mit 4-Taktmotor und deren Standardabweichung.....                   | 49 |

|                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 37: Mittelwerte der summierten Emissionen über alle Testzyklen je Fahrzeug für die drei 4-Takt betriebenen Zweiräder. ....                                                                                                   | 50 |
| Abbildung 38: Mittelwerte der summierten Emissionen über alle Testzyklen je Fahrzeug mit dem 2-Takt Mofa Peugeot Speedfight 3. ....                                                                                                    | 50 |
| Abbildung 39: Emissionen über dem Dynamikparameter $v \cdot a_{pos}$ im Mittel über alle am Prüfstand vermessenen Testzyklen mit einem BMW F800 GT Motorrad. ....                                                                      | 51 |
| Abbildung 40: Emissionen über dem Dynamikparameter $v \cdot a_{pos}$ im Mittel über alle am Prüfstand vermessenen Testzyklen mit einem KTM 125 Duke Motorrad. ....                                                                     | 51 |
| Abbildung 41: Schema des PHEM Modells. ....                                                                                                                                                                                            | 54 |
| Abbildung 42: PEMS Messergebnisse der FVT an einem EU6 Diesel-PKW auf drei verschiedenen Strecken im Raum Graz mit Fahrstilen von Eco-, Normal- und emissionsprovozierend. ....                                                        | 55 |
| Abbildung 43: Beispiel für die Interpolation der Motorleistung aus einem generischen CO <sub>2</sub> -Kennfeld. ....                                                                                                                   | 56 |
| Abbildung 44: Lage der Leistungspunkte im CO <sub>2</sub> -Motorkennfeld der BMWF800GT. ....                                                                                                                                           | 58 |
| Abbildung 45: Bestimmung der Ausgleichsgeraden zur Kennfeldanpassung bei der KTM125 Duke. ....                                                                                                                                         | 61 |
| Abbildung 46: Benzol Verlauf im ERMES-Zyklus der KTM Duke. Vermutlich ein Messartefakt durch verlegten Vorfilter im FTIR. ....                                                                                                         | 64 |
| Abbildung 47: NH <sub>3</sub> Verlauf im ERMES-Zyklus der KTM Duke. Vermutlich ein Messartefakt durch verlegten Vorfilter im FTIR. ....                                                                                                | 64 |
| Abbildung 48: Stetiger Abfall der Emissionen bei gleicher Last im ECER47 Zyklus der Peugeot Speedfight 3. ....                                                                                                                         | 66 |
| Abbildung 49: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für den Peugeot Speedfight 3 (simuliert mit Kennfeld aus dem RDM Test). ....                                                                                         | 68 |
| Abbildung 50: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für den Honda Zoomer (simuliert mit Kennfeld aus dem RDM Test). ....                                                                                                 | 68 |
| Abbildung 51: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für die KTM 125 Duke (simuliert mit Kennfeld aus den RDC Tests, HC wegen häufigen Analysator-Ausfall nicht dargestellt). ....                                        | 69 |
| Abbildung 52: Mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für die BMW F800GT (simuliert mit Kennfeld aus dem RDC1 Tests). ....                                                                                                 | 69 |
| Abbildung 53: CO Verlauf im Rollentest (alle Rollenzyklen in Serie) aus Messung und aus Simulation mit unterschiedlichen Kennfeldern. ....                                                                                             | 72 |
| Abbildung 54: Vergleich der Kennfeldabdeckung zwischen Rollen- und RDE-Test. ....                                                                                                                                                      | 72 |
| Abbildung 55: Vergleich der aus dem generischem CO <sub>2</sub> -Kennfeld berechneten Arbeit und der über Längsdynamik mit kalibriertem Luftwiderstandsbeiwert berechneten Arbeit in den PEMS Testfahrten für die die BMW F800GT. .... | 74 |
| Abbildung 56: Vergleich von gemessener und simulierter Motordrehzahl mit dem Basisschaltprogramm von PHEM für die BMW F800GT in allen PEMS Tests. ....                                                                                 | 76 |
| Abbildung 57: Beispielhafter Versuchsaufbau eines vollständigen PEMS auf einem BMW F800GT Motorrad. ....                                                                                                                               | 78 |
| Abbildung 58: Mindestanforderungen an Zuladung und Leistungsgewicht für PEMS-Messung. ....                                                                                                                                             | 80 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 59: Histogramme der Zeitanteile Drosselklappenstellung und Drehzahl .....                                                       | 83 |
| Abbildung 60: Leistungshistogramme für on-road Testzyklus "Arzberg" und RDC1 .....                                                        | 84 |
| Abbildung 61: Beispielhafte Auflistung zu verwendender Messgeräte für vollständige Straßenmessungen im Realbetrieb.....                   | 85 |
| Abbildung 62: Vollständiger Aufbau eines PEMS auf einem BMW F800GT Motorrad.....                                                          | 86 |
| Abbildung 63: Sensoranordnung im Abgasrohr.....                                                                                           | 89 |
| Abbildung 64: Vergleich der NO <sub>x</sub> -Konzentrationen gemessen mit einem NO <sub>x</sub> -Sensor und AVL MOVE im WMTC-Zyklus ..... | 89 |
| Abbildung 65: Technische Daten AVL DiTEST GAS 1000 .....                                                                                  | 90 |
| Abbildung 66: Vergleich CO <sub>2</sub> im WMTC-Zyklus .....                                                                              | 91 |
| Abbildung 67: Vergleich CO im WMTC-Zyklus.....                                                                                            | 91 |