



# Simulation von Fahrverbräuchen

Prof. Dr.-Ing. Gregor Bischoff

Leiter des Labors für Verbrennungskraftmaschinen der Hochschule Kempten, Mitglied des Instituts für Energie- und Antriebstechnik IEAT, Hochschule Kempten, Bahnhofstraße 61, 87435 Kempten, gregor.bischoff@hs-kempten.de

Dipl.-Ing. (FH) Florian Ruther

Mitarbeiter am Labor für Verbrennungskraftmaschinen der Hochschule Kempten, Hochschule Kempten, Bahnhofstraße 61, 87435 Kempten, florian.ruther@hs-kempten.de

1	Einführung und Problemstellung.....	386
2	Mobile Abgasmessung .....	386
3	Erstellung von Kennfeldern.....	388
4	Vergleich Simulation Realfahrt.....	389
5	Zusammenfassung und Fazit .....	391
6	Literaturverzeichnis .....	392

## *Abstract:*

*In this article we present a method which indicates the most important parameters of influence concerning the fuel consumption and regulated emissions. Using RDE measurements a consumption map of the vehicle and enhanced mathematical models are created that allow the prediction of fuel consumption and emissions for simulated driving routes. The results show that the simulated fuel consumption fits the measured consumption of the vehicle very good. The deviations between calculated and measured NO<sub>2</sub> and NO are relatively high. This is due to the lack of simulation of the emissions aftertreatment which is not possible as the relevant parameters are not monitored. Further investigations are planned for hybrid vehicles, extended environmental conditions and modelling of the aftertreatment.*

JEL Classification: M31 (Marketing)

Keywords: RDE, Fuel Consumption, Emissions, Automotive, Simulation, PEMS

## 1 Einführung und Problemstellung

Verbräuche und Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen sind in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Eine Reduktion von Emissionen und Verbrauch sind zwei der wichtigsten Ziele der nächsten Jahre, um gesetzliche Vorgaben und Klimaschutzziele zu erreichen. Weiterhin findet eine zunehmende Autonomisierung der Fahrzeuge durch Fahrerassistenzsysteme statt, welche den Fahrer bei der Fahrzeugführung unterstützen.

Da die Emissionen von Kraftfahrzeugen von unterschiedlichen Faktoren wie Umgebungsbedingungen (Wetter), Verkehr, Fahrstrecke und Fahrweise abhängig sind, treten diese daher örtlich und zeitlich sehr unterschiedlich auf und führen besonders in Städten zu lokal hohen Belastungen.

Um für ein bestimmtes Fahrzeug die im Straßenverkehr entstehenden realen Emissionen zu ermitteln, werden heutzutage mobile Abgasmesssysteme (PEMS, Portable Emission Measurement System) eingesetzt.

Diese Messungen lassen jedoch nur Rückschlüsse auf die gefahrenen Strecken zu. Eine Übertragung des Emissionsverhaltens auf beliebige andere Strecken ist ohne Weiteres nicht möglich.

In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, welches die wichtigsten Einflussparameter für den Fahrverbrauch und die Schadstoffentstehung identifiziert und damit eine Voraussage für Verbrauch und Emissionen mit Hilfe eines an der HS-Kempten entwickelten Simulationsmodells für beliebige Strecken ermöglicht.

Die Eingangsgrößen für das Simulationsmodell werden vorab aus Messfahrten ermittelt. Bei diesen Messfahrten werden sowohl die realen Emissionen mit Hilfe eines PEMS-Gerätes als auch wichtige Betriebsdaten des Fahrzeugs aus der OBD-Schnittstelle aufgezeichnet.

Das Verfahren wurde an einem 1,6l Diesel-PKW entwickelt.

## 2 Mobile Abgasmessung

### 2.1 PEMS

Mit Einführung der Abgasnorm Euro 6 c ist für PKW zusätzlich zu den am Prüfstand ermittelten Fahrverbräuchen und Emissionen eine Ermittlung der realen im Fahrbetrieb auftretenden Emissionen vorgeschrieben [1]. Dabei müssen die Kohlendioxide CO<sub>2</sub>, Stickoxide NO<sub>x</sub> und Kohlenmonoxide CO und die Anzahl der emittierten Partikel PN aufgezeichnet werden. Die Messung der Kohlenwasserstoffemissionen HC wird vom Gesetzgeber derzeit für eine Realfahrt nicht gefordert.



Abbildung 1: PEMS an Fahrzeug montiert

Dem Labor für Verbrennungsmotoren der Hochschule Kempten steht ein PEMS der Firma AIP Haldenwang zur Verfügung. Das am Fahrzeug installierte Messsystem ist in Abbildung 1 zu sehen.

## 2.2 RDE-Messfahrt

Grundlage für die benötigten Messdaten liefert eine vom Gesetzgeber vorgeschriebene RDE (Real Driving Emission) Messfahrt [2]. Eine solche Messfahrt dauert laut Vorschrift zwischen 90 und 120 Minuten und wird jeweils zu ca. einem Drittel in der Stadt, auf der Landstraße und auf der Autobahn absolviert. Die Dynamik der Fahrt orientiert sich an dem seit September 2017 für PKW vorgeschriebenen Prüfstandszyklus WLTC (Worldwide Harmonised Light Duty Cycle). In Abbildung 2 ist die gefahrene Strecke in Kempten und Umgebung abgebildet. Die Messgrößen werden dabei in einem Abstand von 1 Sekunde aufgezeichnet.



Abbildung 2: RDE-Messfahrt

### 3 Erstellung von Kennfeldern

Anhand der Daten, die während einer RDE-Fahrt aufgezeichnet werden, lässt sich ein einfaches Motorkennfeld erstellen. Dieses Motorkennfeld, auch Muscheldiagramm genannt, wird gewöhnlich auf dem Motorprüfstand erstellt und gibt den Kraftstoffverbrauch, oder den leistungsspezifischen Kraftstoffverbrauch, abhängig von Drehzahl und Last, also Drehmoment oder effektivem Mitteldruck, an.

Auf dem Motorprüfstand können dabei statische Betriebspunkte angefahren werden, was im realen Betrieb nicht möglich ist. Daher müssen die während der Realfahrt gemessenen transienten Daten, die stark von dynamischen Effekten beeinflusst sind, gemittelt werden [4]. Auf diese Weise können systematisch auftretende Effekte teilweise mitberücksichtigt werden, andere werden durch die Mittelung herausgefiltert.

Abbildung 3 zeigt ein einfaches Verbrauchskennfeld. Die Farbgebung verdeutlicht den steigenden Kraftstoffverbrauch bei höheren Drehzahlen und höheren Lasten, wobei auch kleine Abweichungen vom Trend auffallen, die Wirkungsgradunterschieden zugeschrieben werden können. Die leer gebliebenen Betriebspunkte traten bei der RDE-Fahrt nicht häufig genug auf um einen signifikanten Mittelwert berechnen zu können.

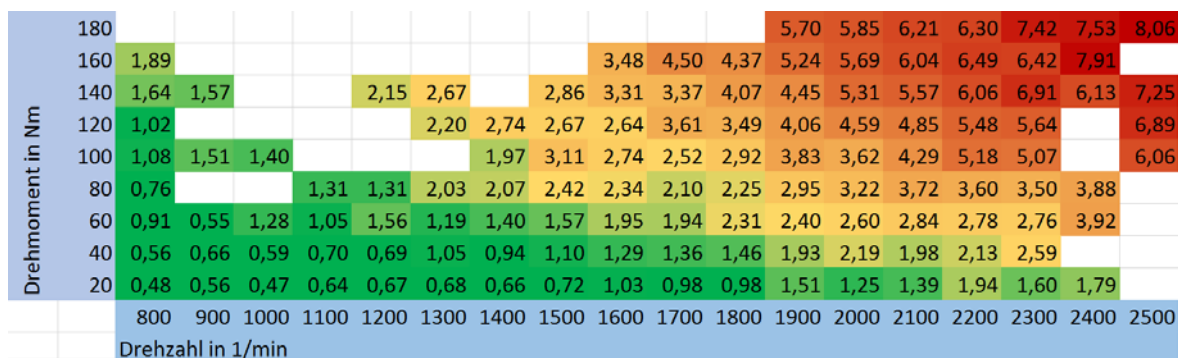


Abbildung 3: Motorkennfeld

Wurde das Motorkennfeld erstellt, kann damit der Verbrauch für andere Strecken bzw. Fahrten berechnet werden. Für diese simulierten Fahrten muss lediglich das Geschwindigkeitsprofil bekannt sein, das einmalig mit einem beliebigen Fahrzeug gemessen werden kann. Das benötigte Drehmoment kann ebenfalls gemessen oder anhand eines Simulationsmodells berechnet werden.

Um genauere Ergebnisse zu erhalten, müssen allerdings neben Drehzahl und Drehmoment noch weitere Parameter berücksichtigt werden. Diese sind für das getestete Fahrzeug die Luftzahl  $\lambda$ , die Rate der Abgasrückführung, die Umgebungstemperatur und die Abgastemperatur. Statt eines sechsdimensionalen Kennfeldes

wurde eine quadratische polynomische Funktion erstellt, die den Verbrauch aus den genannten Parametern berechnen kann. Dazu wurde eine Regressionsanalyse nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate für über 57.000 Datensätze durchgeführt. Die Güte der Regression ist mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 92,7 % akzeptabel.

Mit der gleichen Vorgehensweise können Formeln für die Berechnung anderer Emissionen aufgestellt werden.

#### 4 Vergleich Simulation/Realfahrt

Anschließend wurde der Verbrauch für eine Fahrt, die nicht zur Datenbasis der Regression gehörte, mit Hilfe des Kennfeldes und der polynomischen Funktion prognostiziert und mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen. Es handelte sich dabei um eine Stadtfahrt von ca. 15 Minuten.



Abbildung 4: Stadtfahrt zur Verifikation

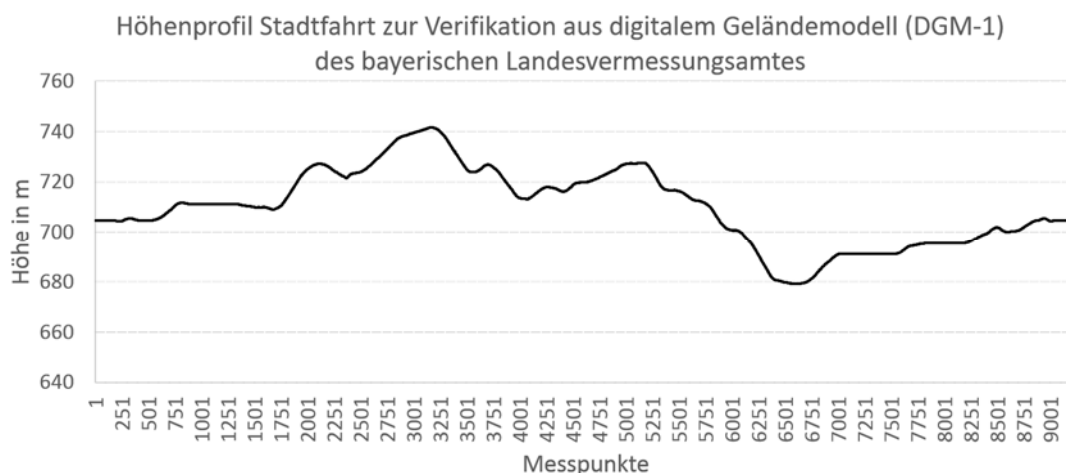


Abbildung 5: Höhenprofil für die Stadtfahrt zur Verifikation

Aus Abbildung 6 wird ersichtlich, dass sich für die Berechnung aus Kennfeld-Daten eine Abweichung über die Dauer der Fahrt aufaddiert, so dass am Ende eine Gesamtabweichung von 23 % entstanden ist. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen entsprechen dem Kraftstoffverbrauch.

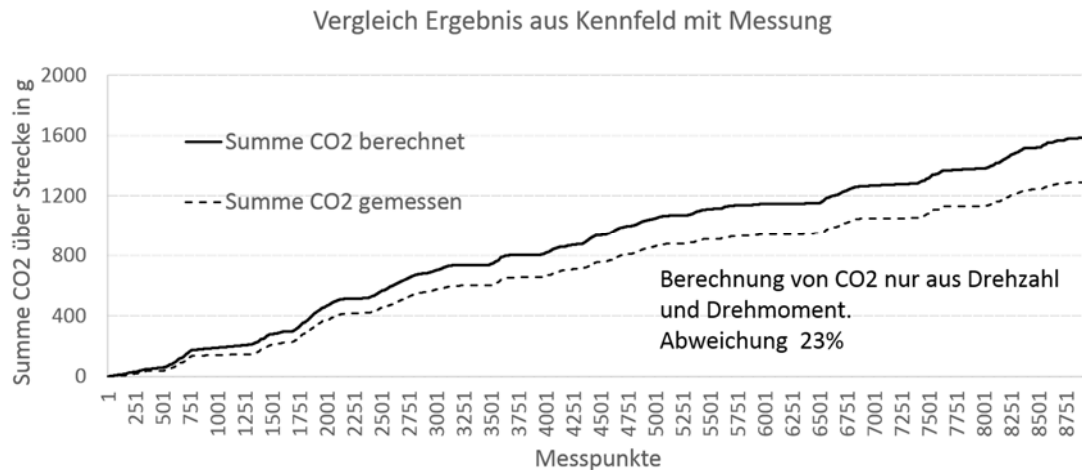


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Ergebnisse von Berechnung mit Kennfeld und Messung

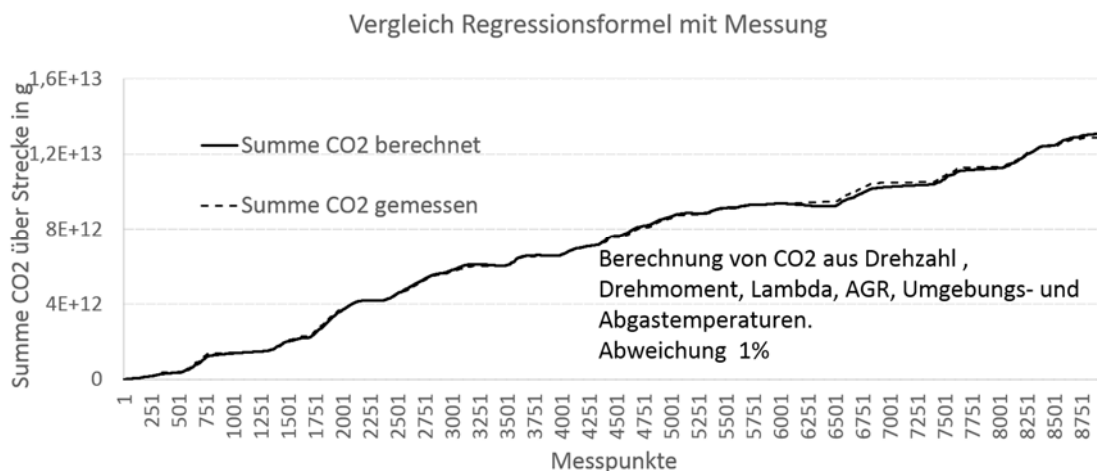


Abbildung 7: Gegenüberstellung von Berechnung mit polynomischer Funktion und Messung

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse für die Messung sowie für die Berechnung mit Hilfe der polynomischen Funktion dargestellt. Die Berechnung ist so genau, dass die Abweichung nie größer als 1 % ist.

Die weiteren Abbildungen sind Beispiele für NO und NO<sub>2</sub>. Hier wird klar, dass bestimmte Emissionsereignisse von der Modellfunktion nicht wiedergegeben werden können.

Bezüglich der Partikelanzahl PN wurde keine Auswertung erstellt, da die gemessenen Werte unterhalb der in der Norm festgelegten Toleranzgrenze lagen. Es traten

nur einzelne Emissionsereignisse auf, für die kein Zusammenhang mit den erfassten Betriebsparametern festgestellt werden konnte.

Die CO-Emissionen lagen nur während des Kaltstarts im messbaren Bereich. Während der restlichen Fahrt wurden nur vernachlässigbar kleine CO-Emissionen festgestellt. Auch hier konnte, wie bei den Partikeln, kein Zusammenhang zu den gemessenen Einflussparametern hergestellt werden.

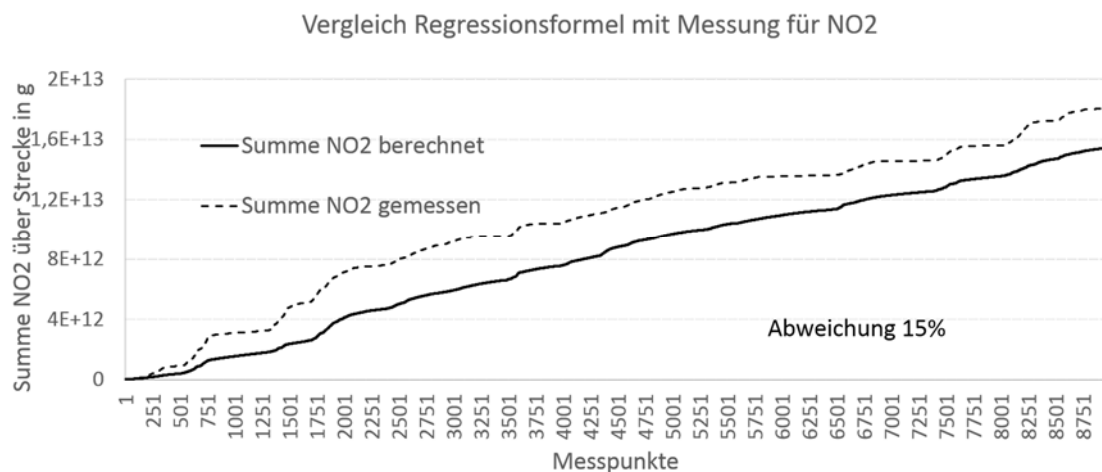


Abbildung 8: Gegenüberstellung von Berechnung und Messung für NO<sub>2</sub>

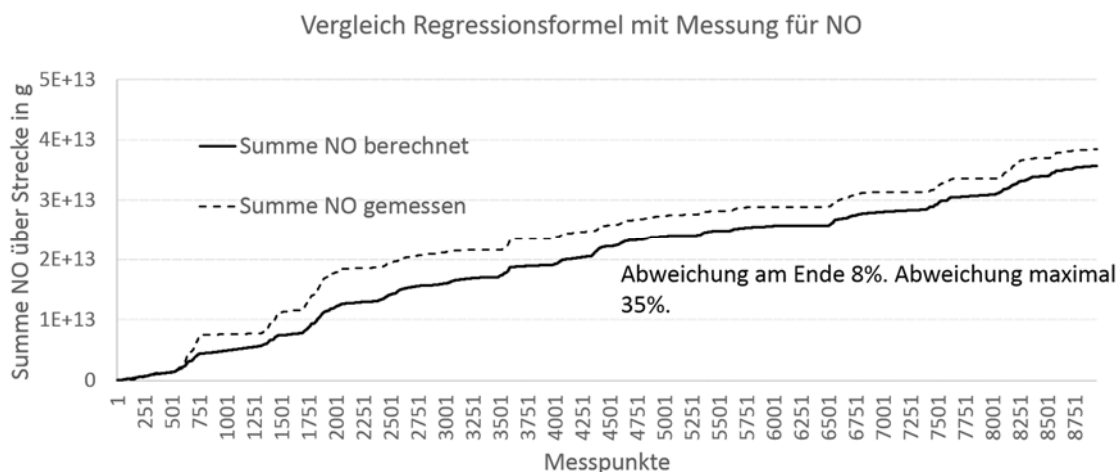


Abbildung 9: Gegenüberstellung von Berechnung und Messung für NO

## 5 Zusammenfassung und Fazit

Wie in diesem Beitrag gezeigt wurde, lässt sich der Kraftstoffverbrauch für unbekannte Strecken anhand eines durch eine Messfahrt ermittelten Kennfeldes sehr gut mit Hilfe der Simulationstechnik in Voraus berechnen. Die Abweichungen sind mit 1 % sehr gering.



Für die Strecke muss ein Geschwindigkeitsprofil vorliegen. Derzeit wird dieses aus einer Messfahrt mit einem beliebigen Fahrzeug einmalig bestimmt. Zukünftig könnte das Profil auch aus Routenplanerdaten erzeugt werden. Mit Hilfe der Simulationstechnik könnte für eine Strecke auch eine optimierte Gangwahl berechnet werden, die zu einem geringeren Verbrauch führt. Auch der Routenverlauf selbst könnte dementsprechend optimiert werden.

Bei den Schadstoffemissionen CO und NO<sub>x</sub> sind die Abweichungen im Gegensatz zum Fahrverbrauch (CO<sub>2</sub>) wesentlich größer. Die Autoren vermuten, dass bestimmte Ereignisse während der Messfahrt zu diesen Abweichungen führen. Da die Abgasnachbehandlungssysteme z. B. eine Abhängigkeit von der Betriebstemperatur haben, diese aber nicht in die Betrachtungen eingeflossen sind, sollte auf die Funktionalität der Abgasnachbehandlung notwendigerweise zur Verfeinerung der Methode ein größeres Augenmerk gelegt werden.

Die Vorteile des Verfahrens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Kostenreduktion durch Verringerung der Zahl der Messfahrten im Entwicklungsprozess
- Identifikation der wesentlichen Einflussparameter für Verbrauch und Emissionen
- Voraussage des Emissionsverhaltens eines Fahrzeuges für eine unbekannte Fahrstrecke
- Reduktion von Emissionen und Verbrauch durch Optimierung der Fahrweise und Streckenführung (Routenplanung)
- Erweiterung bestehender Fahrerassistenzsysteme um Emissionsdaten zur optimierten Fahrzeugführung problemlos möglich

Es ist geplant, die Methodik bei unterschiedlichen Außentemperaturen zu verifizieren. Das Verfahren wurde an einem 1,6l Diesel-PKW entwickelt und soll zukünftig auf weitere Fahrzeugtypen und Antriebsarten wie Hybridantriebe erweitert werden, was hinsichtlich der die Energiespeicher betreffenden Hybridstrategien weiteres Optimierungspotential bietet.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] EU Verordnung 2017/1154 vom 7. Juni 2017.
- [2] EU Verordnung 2017/1151 vom 1. Juni 2017.
- [3] EG Verordnung 715/2007 vom 20. Juni 2007
- [4] Bishop, Justin D. K., et al; Engine maps of fuel use and emissions from transient driving cycles; Applied Energy; Elsevier 2016.