

Prüfeinrichtungen zur Erfassung von Emissionen aus Verdunstungsprozessen und Optimierung des Emissionsverhaltens unter definierten Umweltbedingungen

M. Rampfl ^{1,*}, F. Mayer ¹, K. Breuer ¹, H. Ruoss ², F.-S. Ludwig ³

¹ Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 83626 Valley

² Vötsch Industrietechnik GmbH, 72336 Balingen

³ Bayerische Motoren Werke AG, 80788 München

* e-mail: Michael.Rampfl@ibp.fraunhofer.de

Zusammenfassung

US-behördliche Vorgaben teilen Neufahrzeuge in Emissionsgruppen ein, die von so genannten „Low-Emission Vehicles“ (LEV) bis zu „Zero-Emission Vehicles“ (ZEV) reichen und sich durch unterschiedliche Emissionsgrenzwerte auszeichnen, wobei unter anderem die Größenordnung der Verdunstungsemissionen von Kohlenwasserstoffen für die Eingruppierung von Fahrzeugmodellen von Bedeutung ist. Die Einhaltung der behördlichen Vorgaben sind von Seiten der Fahrzeughersteller für das so genannte „useful life“ eines Fahrzeugs von 15 Jahren beziehungsweise für eine Fahrleistung von 150 000 Meilen zu gewährleisten.

Um gezielte Informationen über den Beitrag einzelner Bauteile, Bauteilgruppen und Fahrzeugkomponenten an der Gesamtemission eines Fahrzeugs zu erhalten, werden am Fraunhofer-Institut für Bauphysik Bauteil- und Baugruppenuntersuchungen sowie Untersuchungen an gesamten Antriebssystemen zur Absicherung und Optimierung des Verdunstungsemissionsverhaltens durchgeführt. Die Untersuchungen werden in speziellen Prüfeinrichtungen unter definierten Umweltbedingungen durchgeführt.

Einführung

US amerikanische Gesetze haben eine Verringerung der Luftverschmutzung für eine Verbesserung der Luftqualität und Minderung von gesundheitlichen Risiken in Ballungsräumen als Zielsetzung. Hierfür werden im Bereich Automobilbau von der „U.S. Environmental Protection Agency“ (EPA) und vom „California Air Resources Board“ (CARB) Emissionsgrenzwerte für Einzelsubstanzen und Stoffgruppen wie Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Formaldehyd (HCHO), Emissionen von Kohlenwasserstoffen (NMOG, „Non-Methane Organic Gases“) und bei Dieselfahrzeugen zusätzlich für Feinstaub (PM) festgesetzt [1 - 3]. Die kalifornischen „LEV II“ Vorgaben von der CARB-Behörde teilen Neufahrzeuge in Emissionsgruppen ein, die von so genannten „Low-Emission Vehicles“ (LEV) bis zu „Zero-Emission Vehicles“

(ZEV) reichen. Für die einzelnen Emissionsgruppen wurden in den „California Low-Emission Vehicle Regulations“ Emissionsgrenzwerte festgesetzt, wobei im Vergleich zu den EPA-Vorgaben in Kalifornien auf die Größenordnung von Verdunstungsemissionen von Kohlenwasserstoffen (NMOG) für eine Eingruppierung von Fahrzeugmodellen ein stärkeres Augenmerk gerichtet wird.

Eine erste kalifornische LEV Regelung fand von 1994 bis 2003 Anwendung. Aus einer Gesetzesnovelle gingen die „LEV II“ Verordnungen hervor. „LEV II“ löste schrittweise während der Fahrzeug-Modelljahre 2004 bis 2006 den „LEV I“ Standard ab und ist seit 2007 für alle neuen Fahrzeugmodelle verbindlich [2]. Der „Low-Emission Vehicle“ (LEV) Standard mit einem NMOG-Grenzwert von 0,5 Gramm an flüchtigen Kohlenwasserstoffen ist eine Mindestanforderung an Neufahrzeuge in Kalifornien und dient neben den anderen CARB-relevanten Stoffgruppen als Bezug für die weiteren Eingruppierungen „Ultra-Low-Emission Vehicle“ (ULEV), „Super-Ultra-Low-Emission Vehicle“ (SULEV), „Partial-Zero-Emission Vehicle“ (PZEV) und „Zero-Emission Vehicle“ (ZEV), für die entsprechend schärfere Vorgaben gelten. Gemäß dem „Zero-Fuel Evaporative Emission Standard“ (Zero-Evap) dürfen Kohlenwasserstoffemissionen einen Grenzwert von 0,35 Gramm nicht überschreiten [1, 2]. Hierbei handelt es sich um so genannte „Non-Fuel“ Emissionen, die beispielsweise von Lacken, Interieur, Reifen und anderen Quellen im Fahrzeug herrühren, wobei der Anteil an Kraftstoffemissionen nicht mehr als 0,049 Gramm (gerundet: 0,0 Gramm) betragen darf. Alle Werte müssen für einen Zeitraum von 15 Jahren beziehungsweise einen Fahrzeugbetrieb bis 150 000 Meilen („useful life“) gewährleistet werden [2, 5].

Um die „LEV II“ und „Zero-Evap“ Vorgaben dauerhaft über die gesamte Fahrzeuglebensdauer sicher zu stellen, ist während der Fahrzeugentwicklung eine Optimierung und später eine Überwachung des Emissionsverhaltens notwendig.

Untersuchungen zur Ermittlung von Verdunstungsemissionen und Überwachung des Emissionsverhaltens von Fahrzeugen werden üblicherweise nach Konditionierung von Fahrzeugen auf Rollenprüfständen in Fahrzeug-SHEDs (SHED: Sealed Housing for Evaporative Determination), das sind Emissionsprüfkammern für Gesamtfahrzeuge, durchgeführt. Hierbei handelt es sich um zeitaufwändige und kostenintensive Untersuchungen, die ab dem Zeitpunkt der Fahrzeugproduktion durchgeführt werden.

Schwerpunkt der Untersuchungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik bilden Untersuchungen und die Beurteilung von Verdunstungsemissionen leicht flüchtiger organischer Verbindungen im „Fuel“- beziehungsweise „Non-Fuel“-Bereich aus Materialien, Fahrzeugbauteilen, Fahrzeugbaugruppen sowie betriebsbereiten Antriebssystemen, d.h. Motoren inklusive Peripherie begleitend zur Entwicklung von neuen Fahrzeugtypen. Material, Bauteil und Baugruppenuntersuchungen erfolgen dabei in SHED-Kammern mit unterschiedlichem Volumen von 100 Liter bis 7,5 m³. Beim Auftreten von Auffälligkeiten kann bereits in einem frühen Stadium mit der Baugruppenoptimierung hin zu niedrigen Emissionen begonnen werden.

Emissionsquellen im „Non-Fuel“-Bereich weisen bei längerer zeitlicher Betrachtung in der Regel Abklingkurven auf, die sich mit der Zeit gegen Null nähern (**Abbildung 1**). Dies ist beispielsweise auf leichtflüchtige Produktionshilfsmittel oder Produktionsrückstände wie Reaktionsbeschleuniger, Lösungsmittel und Treibgase, Zusatzstoffe oder Restmonomere zurückzuführen, die aus Materialien ausdünsten aber nicht erneut nachgebildet werden. Wie schnell dabei die Abnahme der Kohlenwasserstoff-Emissionen von statten geht, ist stark von der Materialbeschaffenheit, der Materialstärke sowie der Flüchtigkeit der emittierten Kohlenwasserstoffe abhängig.

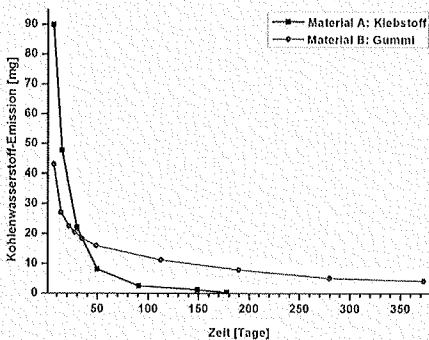


Abbildung 1

Abklingkurven: Exemplarische Darstellung der Kohlenwasserstoffabnahme bei Emissionsmessungen von zwei verschiedenen Materialien A und B über die Zeit („Non-Fuel“-Emissionen)

Bei der Betrachtung von Verdunstungsemissionen im „Fuel“-Bereich kommen als wesentliche Quellen das Kraftstoffsystem mit Kraftstofftank, Aktivkohlefilter sowie Leitungen und das Antriebssystem mit Kraftstoff- und Kraftstoffdampfzuführenden Bauteilen in Frage. Im Folgenden werden Emissionen von Antriebssystemen näher betrachtet. Zur gezielten Optimierung und Überwachung des Emissionsverhaltens von Antriebssystemen wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik ein Prüfzentrum eingerichtet, um betriebsbereite Motoren auf einem Motorenprüfstand unter reproduzierbaren Bedingungen zu konditionieren und im Anschluss in 7,5 m³ Emissionsprüfkammern einzubringen, um mittels Flammenionisationsdetektoren online die Emissionsraten in den SHED-Kammern zu erfassen. Die experimentelle Durchführung erfolgt in Anlehnung an den „Code of Federal Regulations“ (CFR), Title 40 „Protection of Environment“, Chapter I: EPA, Subchapter C „Air Programs“, § 86 „Control of Emissions from new and in-use highway vehicles and engines“ [4]. Die Messdaten werden in einer Datenbank hinterlegt und stehen den Projektpartnern online zur Verfügung.

Untersuchungen am Beispiel von neu entwickelten Motoren zeigen, dass zu Beginn der Entwicklungsphase mit hohen Verdunstungsemissionswerten zu rechnen ist. Begleitend zur Motorentwicklung können emissionsoptimierende Maßnahmen durchgeführt werden, die zu einer deutlichen Reduzierung von Kohlenwasserstoff-Emissionen führen. Breit gestreute Untersuchungen haben bereits wesentliche Emissionsquellen im Bereich der „Fuel“-Emissionen aufgedeckt wie Dichtungen, ungeeignete Schlauchmaterialien etc.

Die Substitution „ungeeigneter“ emissionsstarker Materialien und Bauteile bereits während der Entwicklungsphase von neuen Motoren kann mit wenigen Schritten sehr schnell zu emissionsarmen Motoren bezogen auf die Kohlenwasserstoff-Emissionen führen. Im Fall schnell ansteigender, hoher Verdunstungsemissionswerte während SHED-Messungen werden im Vorfeld der nächsten Messungen gezielte, punktuelle Messungen mit einer FID-Sonde an Motoren außerhalb der SHED-Kammer durchgeführt. Emissionsquellen werden mit dieser Technik schnell identifiziert und im Idealfall bereits vor den folgenden SHED-Messungen beseitigt.

Zielsetzung der Messungen ist die begleitende Optimierung von Bauteilen und Fahrzeugkomponenten während der Entwicklungsphase, damit bei Modelleinführung und Serienfertigung die gesetzlichen Auflagen bzgl. der Verdunstungsemissionen von leichtflüchtigen organischen Verbindungen erfüllt und dauerhaft für die gesamte Lebensdauer eines Fahrzeuges eingehalten werden. Im Idealfall korrelieren die Ergebnisse aus Material und Baugruppenuntersuchungen mit Messungen von Fahrzeugen im Fahrzeug-SHED.

Durchführung

Für Verdunstungsemissionsprüfungen von Antriebssystemen werden betriebsbereite Motorenaufbauten verschiedener Größe und Leistung (4 Zylinder bis 12 Zylinder Motoren mit und ohne Turbolader) in einem volldynamischen Motorenprüfstand betrieben (**Abbildung 2**). Hierbei werden Motoren unter Simulation verschiedener Fahrsituationen wie beispielsweise einer „Stadtfahrt“ mit variierenden Stand-/Leerlauf, Beschleunigungs- und Fahrphasen im so genannten „FTP-75“ Zyklus (United States EPA Federal Test Procedure FTP 75) [3, 4, 6] reproduzierbar konditioniert (**Abbildung 3**). Dies beinhaltet den Betrieb mit zertifizierten Referenzkraftstoffen wie z.B. „CEC Experimentation Fuel RF-11-A-96“ bei konstanter Kraftstoff- und Umgebungstemperatur. Zahlreiche Fahrzeugkenngrößen wie Fahrzeugmasse, Raddurchmesser, Trägheitsmomente, Getriebedaten usw. sind für verschiedene Motor/Fahrzeugkombinationen im Steuer- und Regelsystem des Motorenprüfstandes hinterlegt, um die Motoren realitätsorientiert zu betreiben und zu altern sowie die tatsächliche Fahrzeugintegration zu simulieren.

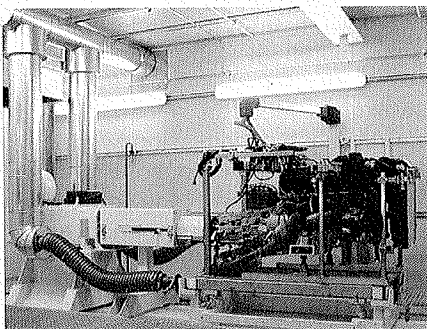


Abbildung 2

Konditionierung eines Motorenaufbaus in einem volldynamischen Motorenprüfstand im Vorfeld einer Emissionsmessung

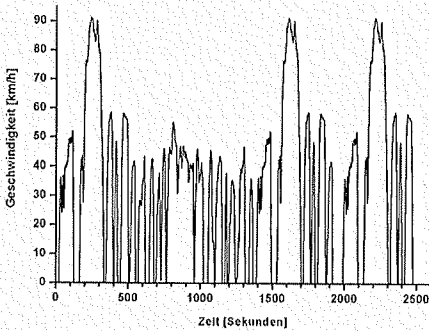


Abbildung 3
Motorbetrieb bei variierenden Stand-, Beschleunigungs- und Fahrphasen zur Simulation einer Stadtfahrt in Anlehnung an CFR 40, Part 86, Appendix I [4]

Im Anschluss an die Konditionierung werden die Motoren über einen Kran und einen Beladewagen mit Schienen in 7,5 m³ SHED-Kammern eingebracht (**Abbildungen 4 und 5**) und dort mit einem von der CARB-Behörde vorgegeben Temperaturzyklus geprüft. Das Temperaturprofil für einen 24 Stunden Testzyklus („Diurnal emission test“) ist in **Abbildung 6** dargestellt, der Temperaturverlauf steht hier stellvertretend für einen typischen Tagesverlauf in Kalifornien.

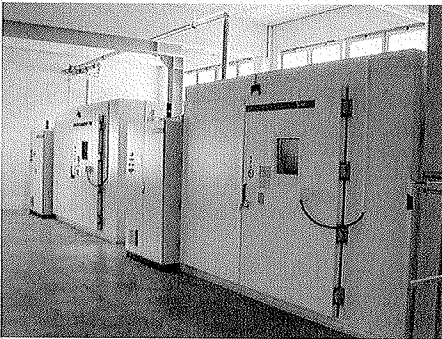


Abbildung 4
7,5 m³ Emissions-Prüfkammern

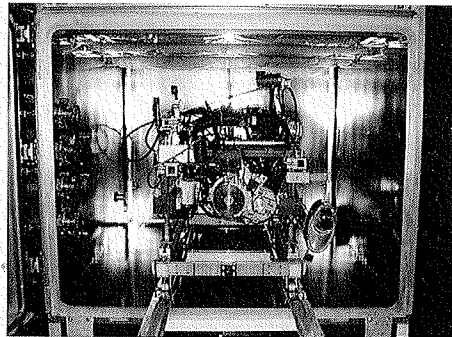


Abbildung 5
Motorenaufbau in 7,5 m³ SHED-Kammer für Emissionsmessung

Während der SHED-Prüfzyklen wird mit Flammenionisationsdetektoren Probenluft aus dem Prüfraum gesaugt, analysiert und daraus der Kohlenwasserstoffgehalt in der Prüfkammer in Milligramm berechnet (**Abbildung 6**). Dieser Wert entspricht der Kohlenwasserstoff-Emission der Testmotoren. Aufgrund der Tatsache, dass „Non-Fuel“-Emissionen bei Motoren durch Wärmeentwicklung sehr schnell aus verbauten Kunststoffmaterialien „ausgeheizt“ werden, wird davon ausgegangen, dass es sich bei den Emissionen von Antriebssystemen im Wesentlichen um „Fuel“-Emissionen handelt.

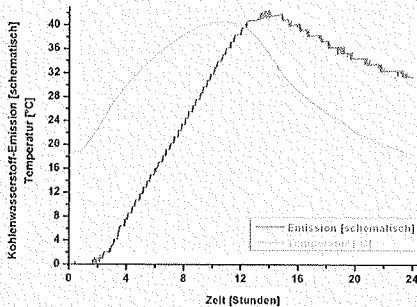


Abbildung 6

Temperaturprofil und Kohlenwasserstoff-Emissionen während einer Emissionsmessung („Diurnal emission test“), Durchführung gemäß CFR [4] und CARB [1]

Messtechnik

Motorenprüfstand

Gerätetyp:	Modularer Containerprüfstand „FEV ModuTainer“
Hersteller:	FEV Motorentchnik GmbH, Aachen
Nennleistung:	110 kW
Drehmoment:	700 Nm
Klimatisierung:	20 °C, ± 3 °C (während Betriebsphasen)
Fahrtwindgebläse:	0 bis 90 km/h (dynamisch)
Kraftstofftemperatur:	20 °C, ± 1 °C
Kraftstoffdruck:	0,5 bis 10 bar
Steuerung:	TCM-Software (FEV)
Datenerfassung:	IMEDAS-Datenbank (IBP) mit online Visualisierung

Emissionsprüfkammern

Gerätetyp:	VCE 5000
Hersteller:	Vötsch Industrietechnik GmbH, Balingen
Rauminhalt:	7,5 m ³
Temperaturbereich:	+15 °C bis +130 °C, ± 0,3 °C
Aufheizgeschwindigkeit:	0,7 °C / min
Abkühlgeschwindigkeit:	0,7 °C / min
Steuerung:	SIMPATI-Software (Vötsch)
Datenerfassung:	IMEDAS-Datenbank (IBP) mit online Visualisierung

FID-Messtechnik

Gerätetyp:	FID 2000 MP
Hersteller:	Testa GmbH, München
Brenngas:	Wasserstoff
Brennluft:	katalytisch gereinigte, kohlenwasserstofffreie Luft
Nullgas:	katalytisch gereinigte, kohlenwasserstofffreie Luft
Prüfgas:	25 ppm Propan in synthetischer Luft
6 Messbereiche:	0 bis 10000 ppm (0-30-100-300-1000-3000-10000)
Steuerung:	in SIMPATI-Software (Vötsch) eingebunden
Datenerfassung:	IMEDAS-Datenbank (IBP) mit online Visualisierung

Referenzkraftstoffe

Kraftstoffsorte 1: CEC Experimentation Fuel RF-11-A-96
Herstellung / Vertrieb: Haltermann Products (DOW Olefin), Hamburg

Kraftstoffsorte 2: Provisional California RFG Phase III, 10% v/v EtOH
Herstellung / Vertrieb: Haltermann Products (DOW Olefin), Hamburg

Die Kraftstoffversorgung des Motorenprüfstandes erfolgt über eine Tankanlage mit einer Lagerkapazität von jeweils 20 000 Liter je Referenzkraftstoff.

Ergebnisse und Diskussion

Untersuchungen an einer Motorneuentwicklung zeigen, dass ein Motor ohne Optimierungsmaßnahmen die gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich der Verdunstungsemission von Kohlenwasserstoffen häufig nicht erfüllen würde. Bereits mit wenigen emissionsvermindernden Maßnahmen kann der Motor jedoch dahingehend weiterentwickelt werden, dass er die entsprechenden Anforderungen erfüllt (**Abbildung 7**). Mehrfachmessungen belegen, dass Emissionsmaßnahmen zu einer deutlichen Herabsetzung und Stabilisierung des Emissionsverhaltens von Motoren beitragen können, Messungen mit entsprechenden Optimierungsmaßnahmen weisen eine gute Wiederholbarkeit auf.

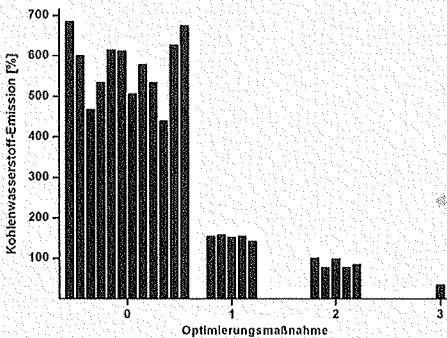


Abbildung 7

Emissionsverhalten eines neuen Motortyps, an dem noch keine Optimierungsmaßnahmen durchgeführt wurden (0) bzw. nach 1, 2 und 3 Optimierungsschritten. Jeder Balken steht dabei für eine Messung.

Messergebnisse von Motoren aus der Serienproduktion weisen eine gute Wiederholbarkeit auf, wenn Mehrfachmessungen einzelner Motoren und auch Mehrfachmessungen mit verschiedenen Motoren aus der Serienfertigung durchgeführt werden. Die Messwerte der Serienmotoren liegen im Bereich der Messwerte der optimierten Entwicklungsmotoren. Dies belegt, dass die Resultate der Optimierungsmaßnahmen aus der Entwicklung reproduzierbar auf die Serie übertragbar sind (**Abbildung 8**).

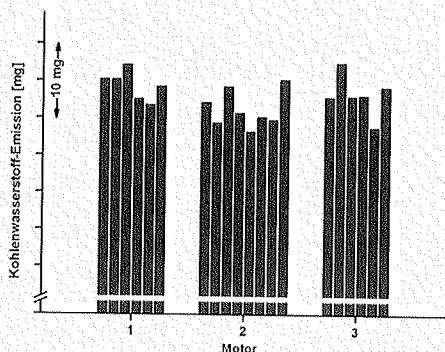


Abbildung 8

Emissionsverhalten von 3 Motoren aus der Serienfertigung, die jeweils mehrfach gemessen wurden. Jeder Balken steht dabei für eine Messung.

Fazit und Ausblick

Eine zielorientierte, systematische Aufklärung von Emissionsquellen führt in vielen Fällen zu einer schnellen Emissionsoptimierung hinsichtlich der Kohlenwasserstoffausdünstungen, die bereits begleitend zu Entwicklungsprozessen neuer Fahrzeugmodelle und Motoren stattfinden kann. Über entwicklungsbegleitende Emissionsoptimierung und über Dauerlaufmessungen zur Erkennung von verschleißbedingten Schwachstellen kann sicher gestellt werden, dass gesetzliche Anforderungen hinsichtlich der Kohlenwasserstoffausdünstungen vom Zeitpunkt der Modelleinführung bis zum Ende einer Fahrzeuglebensdauer von 150 000 Meilen bzw. 15 Jahren gewährleistet werden und somit ein Beitrag für eine bessere und gesündere Umwelt geleistet wird.

Danksagung

An dieser Stelle gebührt besonderer Dank Herrn Rainer Rampf für die gewissenhafte Vorbereitung und Durchführung der Emissionsmessungen sowie Jürgen Grusdat und Bastian Barth für den Support bei der Inbetriebnahme von Testmotoren.

Literatur

- [1] California Air Resources Board (CARB), California Evaporative Emission Standards and Test Procedures for 2001 and Subsequent Model Motor Vehicles, Adopted: August 5, 1999
- [2] California Air Resources Board (CARB), California Low-Emission Vehicle Regulations, With Amendments Effective from January 1, 2006
- [3] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Federal Test Procedure Review Project: Preliminary Technical Report (EPA 420-R-93-007), May 1993
- [4] Code of Federal Regulations (CFR), Title 40: Protection of Environment, Chapter I: Environmental Protection Agency (EPA), Subchapter C: Air Programs, Part 86: Control of Emissions from New and In-use Highway

Vehicles and Engines, 2006 (Electronic Code of Federal Regulations, e-CFR, current data of December 18, 2006)

- [5] L. Dixon, I. Porche, J. Kulick, Driving Emissions to Zero, Published by RAND, Santa Monica, 2002
- [6] A. Faiz, C. S. Weaver, M. P. Walsh, Air Pollution from Motor Vehicles – Standards and Technologies for Controlling Emissions, Published by The World Bank, Washington D.C., 1996