

Gas-Massensensorik für neues KBA-Emissions-Screeningtool

Das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) setzt seit 2016 mobile Messgeräte (Portable Emissions Measurement System, PEMS) ein. Diese Messsysteme testen Fahrzeuge auch außerhalb des Abgaslabors im realen Fahrbetrieb auf ihren Schadstoffausstoß. Die Prüfung der Einhaltung der Grenzwerte und damit die Wirksamkeit des Emissionskontrollsystems unter bestimmten Fahr- und/oder Umgebungsbedingungen erfolgt nach der Messfahrt anhand der gewonnenen Daten.

Aufgabenstellung

Die bislang verwendeten portablen Emissionsmesssysteme (PEMS) sind mit relativ hohen Kosten verbunden und in der konstruktiven Auslegung der Befestigung an der Anhängerkupplung eine Herausforderung. Diese können je nach Anbaumöglichkeiten bis zu 100 kg wiegen, was ein enormes zusätzliches Gewicht darstellt und die Montage physisch wie auch zeitlich erschwert.

Das KBA wollte ein zusätzliches Messsystem, das als schnell und vergleichsweise einfach einsetzbares, kostengünstiges Screening-Tool verwendet werden kann, um das Emissionsverhalten von Fahrzeugen einzuschätzen. Dieses neu zu entwickelnde Screening-Tool und Mini-PEMS sollte die Feldüberwachung sowohl von Fahrzeugen mit Benzin- als auch Dieselmotoren in kurzen Zeiträumen ermöglichen und mit hinreichend hoher Genauigkeit erste Informationen über die Emissionskontrollstrategie des Testfahrzeuges aufzeigen. Ein den Vorstellungen des KBA entsprechendes Messinstrument war bislang nicht am Markt verfügbar. Als zentrales Sensorelement zur präzisen und dynamischen Messung der Abgasmenge dient ein Gasmassensensor von systec Controls.

Der Weg zum Screeningtool

Von der Konzeption über die Definition des Lastenhefts bis hin zur Erstellung eines Prototyps entwickelte ein Student am Institut für Mechatro-

nik und Maschinenbau, im Rahmen einer Masterarbeit an der Technischen Universität Hamburg, einen funktionierenden Prototyp. Verantwortlicher Prüfer der TUHH, der im Januar 2020 abgeschlossenen Arbeit, war Prof. Dr.-Ing. Thorsten A. Kern. KBA Ingenieure (gleichzeitig interne Betreuer der Masterarbeit) trieben nach Einreichung der Arbeit die finale Marktreife des Prototypen weiter voran.

Auswahl der Massenstrom-Sensorik

Die Bewertung der Messtechnik-Auswahl wird hier beispielhaft an der Massenstrommessung dargestellt: Im ersten Schritt wurde, ausgehend von den Einsatzbedingungen und den damit geforderten Eigenschaften, eine Vorauswahl von drei Messgeräten getroffen. Anforderungen: Der Druckverlust soll unter 20 mbar liegen, damit kein Einfluss auf die Emissionsregelung der zu prüfenden Fahrzeuge auftritt. Weiter sollte Resistenz gegen die auftretenden Temperaturen und Inhaltsstoffe des Abgases vorhanden sein.

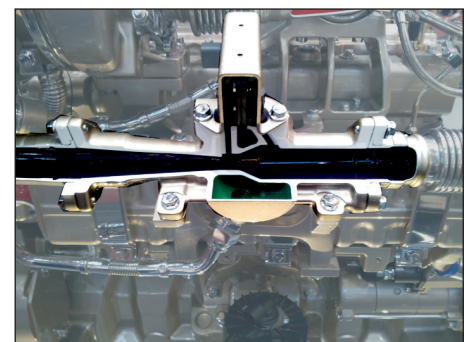
Die drei bewerteten Messgeräte sind ein Venturi-Durchflussmessgerät, ein Durchflussmessgerät nach dem Pitotrohr-Prinzip und ein Flügelradzähler. Das Venturi-Durchflussmessgerät bestimmt die Strömungsgeschwindigkeit durch Messung des Differenzdruckes an einer Querschnittsverengung. Durchflussmessgeräte nach dem Pitotrohr-Prinzip messen einen Druckunterschied zwischen zwei Punkten.



▲ Das Display des Mini-PEMS Screeningtools, montiert an der Windschutzscheibe. Bild: systec Controls



▲ TF14B Flanschversion



▲ Messung nach Venturiprinzip in Abgasrückführung.

Diese Punkte liegen so, dass Staudruck und statischer Druck erfasst werden. Aus dem Druckunterschied lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit berechnen.

Flügelrad-Durchflussmessgeräte bestimmen die Strömungsgeschwindigkeit

Hersteller/Sensortyp	Venturirohr		Flügelrad		Pitotrohr	
Preis	100 %	2	50 %	3	200 %	1
Temp. Beständigkeit	≥700 °C	3	≤500 °C	1	≤650 °C	2
Abgasbeständigkeit	Voll beständig	3	Partikel anfällig	0	Voll beständig	3
Messbereich	0-800 kg/h	3	0-1000 kg/h	3	0-650 kg/h	3
Schnittstelle	CAN	3	Analog	2	CAN	3
Genauigkeit	≤2 % (wird kalibriert)	3	Nicht bekannt	1	≤2 % (wird kalibriert)	3
Drift	Keine	3	Wird durch Partikel verursacht	2	Keine	3
Ansprechverhalten	Direkt	3	Direkt	3	Muss aufwärmen	2
Auflösung	0,0001 kg/h	3	Nicht bekannt	1	0,0001 kg/h ³	3
Gegendruck	≤10 mbar	2	≤5 mbar	3	≤10 mbar	2
Lieferzeit	3 – 6 Wochen	2	Ca. 5 Wochen	2	Ca. 10 Wochen	1
Größe/Gewicht	Ca. 5 kg	2	Ca. 1 kg	3	Ca. 10 kg	1
Einbaubedingungen	Ein- und Auslauf notwendig, verkürzbar	2	Ein- und Auslauf notwendig	1	Ein- und Auslauf notwendig, verkürzbar	2
Dynamik	Bis zu 2000 Hz	3	Nicht bekannt	1	100 Hz	3
SUMME		37		26		31

0 = Ausschluss; 1 = minimal erfüllt; 2 = gut erfüllt; 3 = optimal erfüllt

▲ **Bewertungsmatrix für Emissionsmessungen.**

keit aus der Drehzahl des Flügelrades. Die Geschwindigkeit kann mit dem Rohrdurchmesser anschließend in den Durchfluss umgerechnet werden. Bei diesen Prinzipien ist es notwendig eine Dichtekorrektur durchzuführen, um den Durchfluss in den Massenstrom umzurechnen, da Abgas nicht als inkompressibel angesehen werden kann. Dies erfordert die Messung von Abgas-Druck und -Temperatur. Die Bewertung zeigt, dass das Venturi-Durchflussmessgerät von system Controls, unter den gegebenen Kriterien, am besten geeignet ist. Gründe: Sehr gute Erfüllung bei Kosten, Gewicht und Schnittstelle.

Das Flügelrad Durchflussmessgerät wird ausgeschlossen, da es durch die Partikel im Abgas beschädigt oder verschmutzt werden kann. Das Pitotrohr-Durchflussmessgerät ist dem von system Controls in den meisten Punkten ebenbürtig, allerdings sind das Gewicht und die Größe als schlechter zu bewerten, die Kosten für das ausgewählte Messgerät nur halb so groß wie die des Pitotrohrmessgeräts.

Allerdings zeigt das Pitot-Rohr eine höhere Genauigkeit. Ein zusätzlicher Vorteil des Venturi-Durchflussmessgeräts ist es, dass die Temperatur und der Druck im Abgas am Endrohr direkt mit aufgenommen wird, wodurch keine weiteren Sensoren für diese Messgrößen ausgewählt werden müssen. Das Mini-PEMS erfasst mittels Extrasensoren von CSM auch NO_x, NH₃-, O₂-Daten. Von Zila kommen die Daten zu Umgebungstemperatur und -Druck, sowie zu Umgebungsfeuchte. Ein GPS-Signal wird über den INCA-Rechner von Robert Bosch mit aufgezeichnet. Die Venturi misst den Massenstrom der Tailpipe-Emission von Fahrzeugen im praktischen Fahrbetrieb. Ziel des Kraftfahrt-Bundesamtes ist es insbesondere die von einer NO_x-Sonde gemessenen Konzentration gewichten zu können. Durch die zusätzlich gemessene Strecke, können die NO_x-Emissionen einer Messfahrt mit streckenbezogenen Grenzwerten in der Einheit mg/s angegeben werden. Die CO₂-Daten stellen dabei einen auf den O₂-Messungen modellierten Wert dar.

Der pulsationsunempfindliche Luftmassensensor

Eingesetzt wurde ein multivariabler Hochtemperatur Luftmassensensor der TFI4B-2P-Baureihe von system Controls. Auf ein Venturirohr montierter Sensor misst durch die kalibrierten Flussgeometrien statisch und dynamisch die Luftmasse, die durch den Motor strömt. Mit 2000 Hz Abtastfrequenz können Pulsationen detektiert und Messfehler vermieden werden. Die Anwendung ist für Abgasmessungen konzipiert, also für Temperaturen bis zu 800 °C. Da bei diesen hohen Temperaturen das Gehäuse der Sensorik zu schmelzen droht, wird es physisch von der Wärmequelle distanziert und die P+ und P-Anschlüsse über temperaturbeständige Schläuche realisiert. Die Temperaturmessung übernimmt ein PT1000, der zusätzlich in die Venturi eingebaut ist. Für die erste Messstrecke, gedacht für hohe Durchflüsse bis zu 800 kg/h, waren Druckverluste unter 10 mbar gefordert. Dies erlaubt präzise Messungen für hohe und mittlere Flüsse. Die



Fahrzeug	Zyklus	NOx		CO ₂		Abgasmassenstrom	
		Mittlerer Fehler	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Standardabweichung
Kfz A	RDE	1,6 ppm	23,6 ppm	1 %	1 %	0,9 kg/h	13,1 kg/h
Kfz A	Doppel NEFZ	0,4 ppm	48,2 ppm	1,5	3 %	4,3 kg/h	14,1 kg/h
Kfz A	Nicht definierte Fahrt im realen Straßenverkehr	0,3 ppm	40,3 ppm	0,6 %	1,8 %	3,7 kg/h	30,3 kg/h

Fahrzeug	Zyklus	NOx		CO ₂		Abgasmasse kg	
		MiniPEMS	PEMS	MiniPEMS	PEMS	MiniPEMS	PEMS
Kfz B	Teil RED	11 mg/km	8 mg/km	166 g/km	153 g/km	57,8	59,9
Kfz A	RDE	53 mg/km	55 mg/km	245 g/km	234 g/km	104,6 kg	105,6
Kfz A	Doppel NEFZ	157 mg/km	181 mg/km	270 g/km	280 g/km	27,6 kg	30,63
Kfz A	Nicht definierte Fahrt im realen Straßenverkehr	114 mg/km	130 mg/km	246 g/km	242 g/km	40,9 kg	43,4 kg

▲ Vergleich der Messwerte MiniPEMS und Standard-PEMS.

zweite Ausführung ist für Durchflüsse von ca. 50 bis 300 kg/h ausgelegt bei max. 20 mbar bleibendem Druckverlust. Damit wird bei Standgas bis in den mittleren Lastbereich gemessen.

Im Stand und dynamischem Fahrbetrieb geprüft und validiert

Im praktischen Fahrbetrieb wurde das Ergebnis der Messungen des Venturi-Systems mit dem Emission Flow Meter (EFM) des Herstellers AVL verglichen. Es erfolgten Standtests sowie Fahrten im dynamischen Fahrbetrieb. Bei den Standtests wurden verschiedene Motordrehzahlen konstant gehalten, um konstante Volumenströme zu erzeugen. Diese wurden über eine Lineare Regression (Messwert EFM und systec Venturi) verglichen. Das Ergebnis war sehr gut, sodass das KBA den Kalibrierfaktor von systec Controls nicht korrigieren musste.

Prüfung der Messgenauigkeit

Das neue Screening-Tool wurde experimentell bei Testfahrten validiert und unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit qualitativ und quantitativ mit den klassischen PEMS-Messgeräten verglichen und bewertet. So wurde die Venturi von systec Controls im Standtest und den in den Tabellen dargestellten Fahrten mit den Ergeb-

nissen des PEMS verglichen. Damit wurde die Funktion des Screening-Tools unter normalen Betriebsbedingungen getestet. Dieser Test sollte auch feststellen, wie sich die kumulierten Ergebnisse unterscheiden, da anhand dieser Daten die Fahrzeuge auf ihre Grenzwerte hin bewertet werden konnten. Im praktischen Fahrbetrieb wurde das Ergebnis der Messungen der Venturi mit dem im PEMS eingesetzten Emission Flow Meter verglichen.

Resümee

Das Screening-Tool für die Abgasanalyse von Fahrzeugen soll eine schnelle Analyse bei geringen Kosten ermöglichen und dem Kraftfahrt-Bundesamt zur sinnvollen Analyse des Abgasverhaltens weitere messtechnische Möglichkeiten bieten. Dank dieses Tools soll die Zahl kostenintensiver Tests mit mobilen Emissionsmessgeräten (Portable Emission Measurement System, PEMS) reduziert werden. Das flexible und schnell montierbare System kann neben dem Abgasmassenstrom und den Umgebungsbedingungen auch verschiedene Bestandteile des Abgases, wie die Stickoxid (NO_x)-Konzentration, die Ammoniak (NH₃)-Konzentration und die Sauerstoff (O₂)-Konzentration mes-

sen. Zusätzlich lassen sich die Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Konzentration und die zurückgelegte Strecke rechnerisch bestimmen. Das System wurde in Vergleichsmessungen in verschiedenen Szenarien mit einem PEMS verglichen, um so die Genauigkeit beurteilen zu können. Die Vergleichsmessungen zeigen, dass das Screening-Tool »Mini-PEMS« mit einem Gasmassensensor von systec Controls eine ausreichend hohe Genauigkeit besitzt, um qualitative Aussagen zu ermöglichen.

► INFO

Autoren:
M. Sc. Phillip Sebastian Krause, TUHH Hamburg · M. Sc. Owe Henning Diederichsen und M. Eng. Kathrin Ahlers, beide Kraftfahrt-Bundesamt (Abteilung Marktüberwachung, Harrislee) · Jan Romberg, Produktmanager (systec Controls, Puchheim)

Kontakt:
systec Controls
Mess- und Regeltechnik GmbH
82178 Puchheim · Tel.: 089 809 06-0
E-Mail: info-systec-controls.de
www.systec-controls.de

Quellen:
Masterarbeit Phillip Sebastian Krause
Frank Wrobel, Referatsleiter »Feldüberwachung, Konformitätsüberprüfung CoP-P, Kraftfahrt-Bundesamt«, Harrislee
systec Controls für techn. Daten Massensensorik