

**Durchführung eines Prüfstands-Dauerlaufs
über 500 h sowie Feldtesterprobung zur Freigabe von DEUTZ-Common-Rail-
Motoren in Nutzfahrzeugen EURO IV für Biodiesel**

UFOP-Projekt-Nr. 540/080

– Abschlussbericht –



erstellt von:

Dr.-Ing. Hans-Walter Knuth

Dipl.-Ing. Markus Winkler

DEUTZ AG

Abgas und Betriebsstoffe

Ottostraße 1

51149 Köln

Köln, September 2009

Allgemein

Die Deutz AG ist ein weltweit agierendes, unabhängiges Unternehmen zur Entwicklung und Herstellung von Dieselmotoren für On- und Offroad-Anwendungen im Bereich 5 bis 500 kW.

Ein wesentlicher Schwerpunkt bei der DEUTZ AG ist schon seit Jahren die Entwicklung von Dieselmotoren, die mit 100 % Biodiesel nach EN 14214 [1] betrieben werden können. Im Technischen Rundschreiben TR 0199-99-3005 [2] wird diesbezüglich umfangreich auf sämtliche Motorfreigaben für Biodieselapplikationen eingegangen.

Projektdarstellung

Ziel des Projekts war die Durchführung von Untersuchungen, um die Motorenbaureihe TCD 2013 4V EURO IV mit DEUTZ-Common-Rail-Einspritzsystem (DCR[®]) im Nutzfahrzeugeinsatz für Biodiesel freizugeben. Der Erprobungsumfang wurde dabei wie folgt definiert:

Motoren- und Funktionstests auf dem Prüfstand (Leistung, Emissionen mit Dieselkraftstoff und Biodiesel)

- 500 h Dauerlauf gemäß DEUTZ-Hausnorm SE 0163 5005
- Eingangsuntersuchung Funktionstests (Leistung, Emissionen)
 - Messung von Leistung und Verbrauch auf der Drehmomentkurve
 - Emissionsmessung in den gesetzlich vorgeschriebenen Testzyklen (ESC und ETC)
- Tägliche Kontrolle des Motorzustands bei Nennleistung
- nach 500 h: Wiederholung des Funktionstests (Leistung, Emissionen)
- Begleitung durch Schmierölanalysen
- Befundung des Motors durch Deutz
- Befundung des Einspritzsystems durch Bosch

Durchführung von Feldtests zur Absicherung der Biodiesel-Tauglichkeit

- 2 Busmotoren, IOB Omnibusverkehr GmbH, Ilmenau
- LKW-Motoren waren ursprünglich auch vorgesehen, wurden dann aber durch den Projektpartner Volvo gestrichen
- Begleitung durch Schmierölanalysen

Diese Kombination von Dauerhaltbarkeitsprüfungen auf dem Prüfstand und im Praxis-Einsatz ist bei der DEUTZ AG eine Standard-Prozedur, welche vor der Freigabe neuer Motoren-Konzepte und spezieller Kraftstoffe durchlaufen werden muss. Die Prüfstandstests werden mit besonders hoher Motorenauslastung gefahren und die Bauteile der Motoren somit sehr hoch belastet, so dass potentielle Schwachstellen zuverlässig erkannt werden können. Zur Diagnose des Motorzustands werden umfangreiche Messwerte aufgenommen, z.B. geben Ölanalysen mit Messwerten von Abriebmetallen schon während des Dauerlaufs wertvolle Hinweise zum Verschleißzustand des Motors. Zum Abschluss des Dauerlaufs wird der Motor demontiert und der Verschleißzustand der einzelnen Motorkomponenten detailliert untersucht.

Da der Prüfstandstest nach einer fest vorgegebenen Prozedur abläuft, ist ein Feldtest eine wichtige und notwendige Ergänzung der Deutz-Freigabe-Prozedur, da hierbei der Motorbetrieb viel variabler ist und außerdem unterschiedliche klimatische Umgebungsbedingungen mit getestet werden.

Die in diesem Bericht dargestellten Messungen zur Freigabe von Biodiesel wurden an einem EURO IV-Busmotor durchgeführt, sie sollen aber auch auf Biodieselfreigaben für EURO V übertragen werden.

Untersuchung der Wirksamkeit des SCR-Abgasnachbehandlungssystem

- Die SCR-Katalysatoren der 2 Busse wurden nach ca. 70 000 km ausgebaut und zur Beurteilung eventueller Beeinträchtigungen vermessen.
- Vermessung Katalysator A:
 - Systematische Vermessung des SCR-Wirkungsgrads bei verschiedenen Abgastemperaturen und Raumgeschwindigkeiten auf dem Motorprüfstand
 - Untersuchungen der Katalysator-Aktivität sowie Messung der Mengenanteile potentieller Katalysator-Giftstoffe bei dem Katalysator-Hersteller
- Vermessung Katalysator B:
 - Durchführung der gesetzlich vorgeschriebenen Testzyklen (ESC und ETC) auf dem Prüfstand nach Anbau des SCR-Katalysators an einem baugleichen Motor

Biodieselsensor

- Vermessung der Sensor-Funktion im Labor mit Kalibrier-Mischungen aus Dieselkraftstoff und Biodiesel
- Einbau eines Biodiesel-Sensors in einen der beiden Feldtest-Busse in Ilmenau
- Erfassung von Messdaten und Sensor-Funktion während des Feld-Tests
- Nachvermessung der Sensor-Funktion im Labor

Mit einem Biodiesel-Sensor kann man messen, ob der aktuell verwendete Kraftstoff aus mineralischem Dieselkraftstoff oder aus Biokraftstoff besteht, auch Mischungen lassen sich mit ihm quantifizieren. Wenn somit die Motorelektronik die Art des aktuell verwendeten Kraftstoffs erkennt, besteht prinzipiell die Möglichkeit, die motorischen Parameter wie z.B. Einspritzmenge und Einspritz-Zeitpunkt auf den aktuellen Kraftstoff optimal anzupassen. Es wäre daher möglich, den Leistungsverlust mit Biodiesel auszugleichen und ebenso die NO_x-Emission anzupassen und letztendlich mit Biodiesel keine negativen sondern nur positive Effekte zu haben. Da bisher bei Deutz kein Biodiesel-Sensor in Serie, sollte bei dem Feldtest die Praxistauglichkeit eines Biodiesel-Sensors, der von BERU auf Grundlage eines FAL-Projekts [3] entwickelt wurde, bisher aber noch nicht in Serien-Applikationen eingesetzt wird, getestet werden. Der Sensor bestimmt den Biodieselgehalt mittels Messung der Dielektrizitätskonstante, außerdem wird die Kraftstoff-Temperatur gemessen. Beide Messwerte werden seriell über eine Schnittstelle zur Verfügung gestellt.

Der Nutzfahrzeugmotor TCD 2013 4V

Bei der Baureihe TCD 2013 4V handelt es sich um einen wassergekühlten 4-Ventil-Reihenmotor mit Deutz Common-Rail-Einspritzung und ohne Abgasrückführung. Zur Einhaltung der Abgasstufen EURO IV und EURO V wird die SCR-Abgasnachbehandlung eingesetzt. Die 4- und 6-Zylindermotoren haben dabei folgende technische Daten:

	TCD2013 L04 4V	TCD2013 L06 4V
Hub:	130 mm	130 mm
Bohrung:	108 mm	108 mm
Hubraum pro Zylinder:	1,19 l	1,19 l
Hubraum:	4,76 l	7,14 l
Kraftstoffverbrauch im Nennleistungspunkt:	210 g/kWh	210 g/kWh
Minimaler Kraftstoffverbrauch:	198 g/kWh	195 g/kWh
Max. Drehmoment:	800 Nm	1200 Nm
Max. verfügbare Leistung:	158 kW/2300 min ⁻¹	235 kW/2300 min ⁻¹ (für EURO IV)
Verfügbare Abgasstufen:	EURO IV + V	EURO IV + V

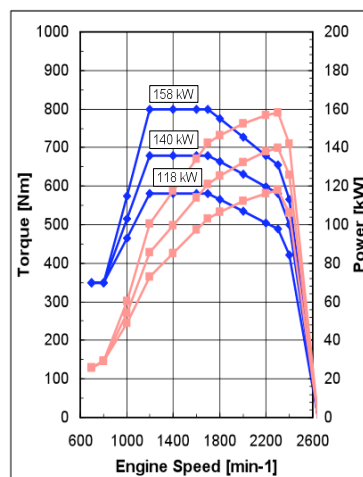
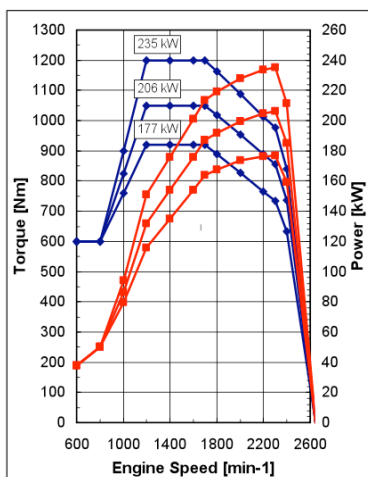


Abbildung 1: Leistungsprofil 6-Zylinder Motor / Leistungsprofil 4-Zylindermotor

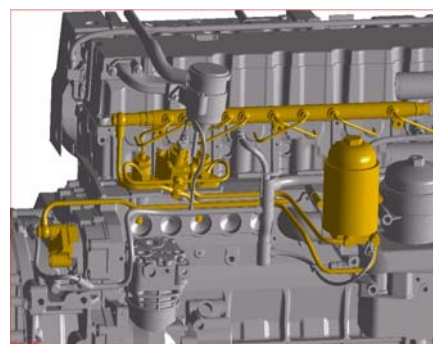
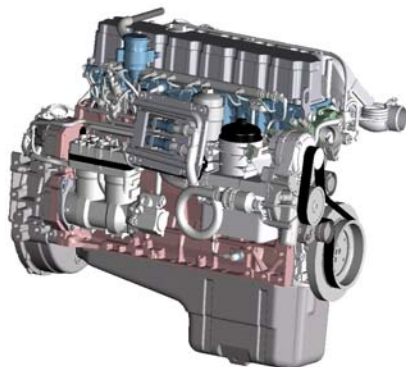


Abbildung 2: Motor-Schnittbild mit DEUTZ-Common-Rail-Einspritzsystem (DCR®)

Ergebnisse der Motoren- und Funktionstests auf dem Prüfstand

Die 500h-Dauerlauf wurde gemäß DEUTZ-Hausnorm SE 0163 5005 [4] durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Prüfstandsprogramm mit hohen Volllast- und Überlastanteilen. Neben der täglichen Kontrolle des Motorzustands bei Nennleistung erfolgte eine Eingangsuntersuchung mit Leistungs- und Emissionsüberprüfung sowie eine Wiederholung des Funktionstest am Ende des Dauerlaufprogramms. Abschließend wurde eine Motorbefundung und Analyse des Einspritzsystems durch DEUTZ und Bosch durchgeführt.

Die tägliche Kontrolle zeigte keine Auffälligkeiten. Bei der Leistungsüberprüfung vor und nach Dauerlauf wurden im Biodieselbetrieb Minderleistungen von ca. 9% gegenüber dem Dieselbetrieb in der Drehmomentkurve ermittelt. Der spezifische Mehrverbrauch mit Biodiesel lag bei ca. 12 Massen-%.

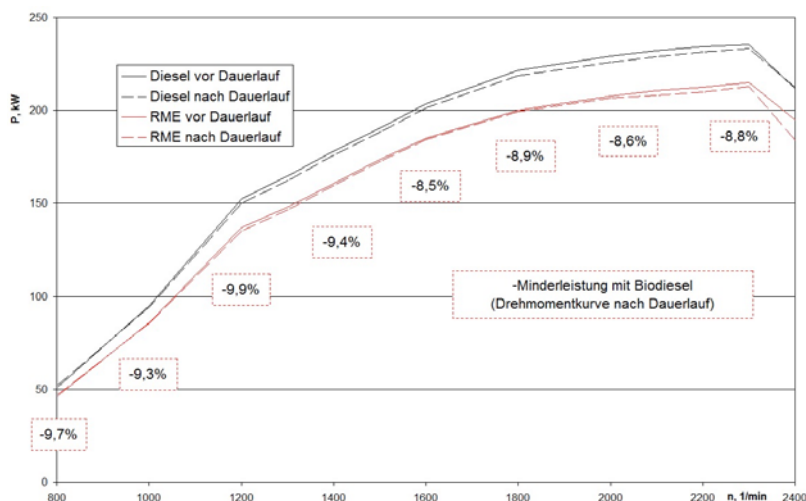


Abbildung 3: Motorleistung von Diesel/FAME vor und nach dem 500h-Dauerlauf

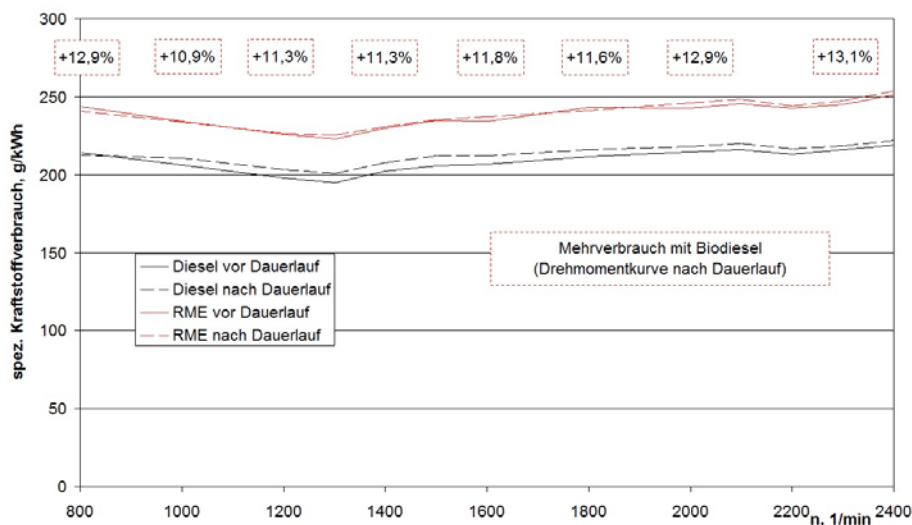


Abbildung 4: Spezifischer Verbrauch von Diesel/FAME vor und nach 500h-Dauerlauf

Die niedrigere Leistung und der höhere Verbrauch mit Biodiesel ist durch den niedrigeren Heizwert und die höhere Dichte zu erklären. Die gemessenen Unterschiede zu Dieseldieselkraftstoff liegen im zu erwartenden Bereich. Sowohl für Biodiesel wie auch für Dieseldieselkraftstoff sind die Leistungs- und Verbrauchswerte nach dem Dauerlauf praktisch unverändert gegenüber der Messung vor dem Dauerlauf, d.h. der Biodieselbetrieb hat die wesentlichen Motorparameter nicht verändert.

Der Motor wurde vor Dauerlauf mit FAME und Diesel im ESC-Zyklus (European Steady Cycle) und nach Dauerlauf zusätzlich auch im ETC-Zyklus (European Transient Cycle) vermessen. Hinsichtlich der Emissionen zeigen sich niedrigere Werte bei den CO-, HC- und Partikelemissionen. Insbesondere die Rußemissionen, welche einen wesentlichen Anteil der Partikelemissionen ausmachen, sind durch Biodiesel stark reduziert (bis zu 66 %!). Dieser positive Aspekt des Biodiesels ist durch den Sauerstoffanteil der Moleküle bedingt, welcher die Rußbildung, die immer mit lokalem Sauerstoffmangel einhergeht, vermindert. Die NO_x-Emissionen sind dagegen erhöht, im stationären ESC um ca. 10 % und im instationären ETC sogar um ca. 20 %. Die höheren NO_x-Emissionen mit Biodiesel sind durch höhere Brennraumtemperaturen aufgrund des Sauerstoffanteils der Moleküle erklärbar.

Durch den 500h-Dauerlauf mit Biodiesel werden die Emissionswerte nicht negativ beeinflusst. Die Messwerte weisen sogar z.T. eine leichte Verringerung der Emissionen aus.

Test power		Nitrogen oxides NO _x	Hydrocarbons HC	Carbon monoxide CO	Particulate Matter PM	Soot
	kW	g/kWh	g/kWh	g/kWh	mg/kWh	mg/kWh

		Diesel	RME	Diff, %
before durability run	Diesel	116,1	106,2	-8,5
	RME	116,1	106,2	-8,5
	Diff, %	116,1	106,2	-8,5
after durability run	Diesel	115,8	105,6	-8,8
	RME	115,8	105,6	-8,8
	Diff, %	115,8	105,6	-8,8
% change after/before	Diesel	-0,3	-0,6	
	RME	-0,3	-0,6	

		Diesel	RME	Diff, %
after durability run	Diesel	70,4	63,74	-9,5
	RME	70,4	63,74	-9,5
	Diff, %	70,4	63,74	-9,5

Abbildung 5: Emissionsmessungen im ESC- und ETC-Test von Diesel/FAME vor und nach 500h Dauerlauf

Die abschließende Motorbefundung und die Analyse des Einspritzsystems durch DEUTZ und Bosch zeigten keine Auffälligkeiten, allerdings gibt es keine Serienfreigabe von Bosch bzgl. FAME-Betrieb, so dass das Risiko von Qualitätskosten durch DEUTZ übernommen werden muss.

Feldtests zur Absicherung der Biodieseltauglichkeit

Die Feldtesterprobung erfolgte bei den Busbetrieben Ilmenau in zwei Stadtbussen des Typs Volvo 8700 RLE (TCD 2013 L06 4V, IK-OV 78 (Motor-Nr. 10259324) und IK-OV 79 (Motor-Nr. 10259325).

Die Busse wurden ausschließlich im reinen Stadtbusbetrieb mit Biodiesel nach DIN EN 14214 eingesetzt und ca. 100 000 km gefahren.



Abbildung 6: Biodieselerprobung im Stadtbusbetrieb

Während der Felderprobung kam es nur zur geringfügigen Auffälligkeiten. Da die Elastomerteile in der Kraftstoffleitung zwischen Kraftstoffförderpumpe und Steuergerät nicht beständig waren, wurden bei beiden Bussen nach ca. 30000 km diese gegen Biodiesel-resistente Schläuche getauscht. Diese Kraftstoffleitungen sind mittlerweile in die Serie eingeführt worden. Zudem wurden Lackschäden im Falle von Biodiesel-Benutzungen festgestellt.

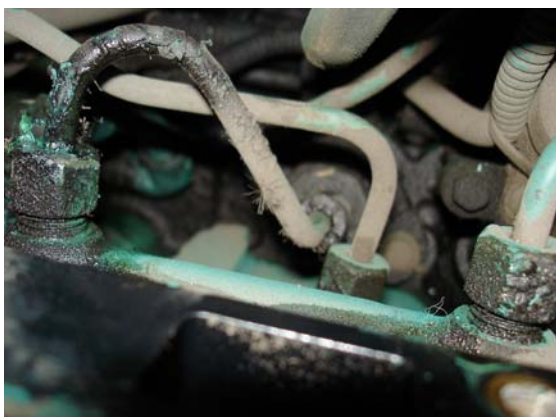


Abbildung 7: Lackschäden am Motor

Die beiden Abgasnachbehandlungssysteme wurden bei ca. 70 000 km ausgebaut und von DEUTZ und den Katalysatorherstellern Johnson Matthey befundet. Der SCR-KAT von IK-OV 78 wurde dabei durch einen neuen Katalysator getauscht, im 2.Bus IK-OV 79 wurde das zuvor ausgebaute SCR-System wieder bis zum Ende des Feldtests wieder eingebaut.

Die ursprünglich geplante Erprobung von 3 Truckmotoren wurde aufgrund der derzeitigen wirtschaftlichen Lage und technischer Probleme (keine Verfügbarkeit von Biodiesel in Nordschweden, schlechte klimatische Bedingungen für einen Biodieseleinsatz) durch den Projektpartner Volvo zurückgestellt.

Schmieröl-Analysen während des Feldtests

In regelmäßigen Abständen wurden bei beiden Motoren Schmierölanalysen genommen und alle typischen Gebrauchölparameter im DEUTZ Öllabor analysiert. Die Analysen wurden dabei nach den aktuell anerkannten DIN-Prüfmethoden durchgeführt.

TCD2013L06-4V SN. 10259324			Run time engine, km			7682	17060	28432	46004	59132	78076	93700	Deutz limit
			Run time oil, km			7682	17060	28432	13419	26619	16433	32057	
FAME content	% mass	Infrared method	1,9	4,1	8,1	8,4	14,8	9,8	16,3	10			
Viscosity, 100°C	mm ² /s	EN ISO 3104	11,3	10,62	8,72	10,39	9,1	10,09	9,52	9,3 (15W.)			
Soot	% mass	DIN 51452	< 0,1	0,17	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	3,0			
Silicon	mg/kg	DIN 51396-1	36,1	44,7	41,3	7,2	8,5	5,4	8,6	20			
Iron	mg/kg	DIN 51396-1	19,1	27,3	35,4	6,4	10,8	11,1	23,9	150			
Lead	mg/kg	DIN 51396-1	1,8	3,4	11,4	2,2	3,3	5,4	38,5	30			
Copper	mg/kg	DIN 51396-1	7,4	15,3	29,3	3,5	6,6	5,9	12,7	20			
Chromium	mg/kg	DIN 51396-1	1,8	2,6	3,9	< 0,1	0,5	2,2	3,4	20			
Aluminium	mg/kg	DIN 51396-1	1,8	3,9	7	0,7	3,4	2,9	4,2	25			
Sodium	mg/kg	DIN 51396-1	4,8	6,3	8,5	2,6	3,4	8,5	10				

TCD2013L06-4V SN. 10259325			Run time engine, km			1486	20799	30340	43900	57729	78723	95878	Deutz limit
			Run time oil, km			1486	20799	30340	8630	22459	18034	35189	
FAME content	% mass	Infrared method	0,2	5	8,6	5,9	12,6	10,9	12,9	10			
Viscosity, 100°C	mm ² /s	EN ISO 3104	11,78	10,56	9,92	11,12	9,44	9,78	9,79	9,3 (15W.)			
Soot	% mass	DIN 51452	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	3,0			
Silicon	mg/kg	DIN 51396-1	19,2	34,5	31,3	4,3	5,8	4,9	5,3	20			
Iron	mg/kg	DIN 51396-1	6,6	20,6	26,5	1,7	8,6	9,2	15,2	150			
Lead	mg/kg	DIN 51396-1	1	3,1	9,4	2,1	2,6	5,2	14	30			
Copper	mg/kg	DIN 51396-1	6,1	18,4	27,4	< 0,1	5,7	4,8	7,7	20			
Chromium	mg/kg	DIN 51396-1	0,5	2,2	3,2	< 0,1	0,3	1,5	1,9	20			
Aluminium	mg/kg	DIN 51396-1	1,1	3,3	4,8	< 0,1	0,9	2,3	2,6	25			
Sodium	mg/kg	DIN 51396-1	5,2	6,8	14,4	2,6	3,8	4,4	4,5				

Engine Oil: Agip Sigma TFE 10W-40, kinematic viscosity of fresh oil: 14,4 mm²/s

Abbildung 8: Ölanalysen Feldtestmotoren (Ölqualität DQC III-05)

Rechts in der Tabelle sind die Deutz-Gebrauchöl-Grenzwerte angegeben. Messwerte, die diese Grenzwerte überschreiten, sind je nach Höhe der Überschreitung farblich hervorgehoben.

Bis zum ersten Ölwechsel nach ca. 30000 km sind bei beiden Motoren erhöhte Siliziumanteile auffällig (Deutz-Grenzwert: 20 mg/kg). Diese Werte sind ein bekanntes Phänomen bei Neumotoren und durch den sogenannten Urschmutz (Gussrückstände, Rückstände aus der mechanischen Bearbeitung) zu erklären.

Die erhöhten Siliziumwerte lagen nur bei dem ersten Ölwechselintervall vor und nicht bei dem zweiten und dritten Intervall. Auch die erhöhten Kupferwerte während des ersten Ölwechsels hängen mit Verschleiß durch den Urschmutz zusammen.

Hauptproblem bei dem Betrieb mit Biodiesel ist allerdings ein erhöhter Eintrag an FAME in das Motorenöl und als Folge dieses Eintrags deutlich abgesenkte Viskositäten. Der Deutz-Grenzwert von 10 Vol-% Biodieseleintrag wurde überschritten. Der relativ hohe FAME-Eintrag in das Schmieröl ist insbesondere durch den niedrigausgelasteten Stadtbetrieb erklärbar, in dem hoch ausgelasteten Dauerlauf betrug der FAME-Eintrag nur ca. 2 Vol-%. Als Folge des Biodieseleintrags kann es zu chemischen Reaktionen und Polymerisationen im Motoröl mit nachfolgenden Motorschäden kommen. Aus diesem Grund wird für den Biodieselbetrieb eine Halbierung der Ölwechselintervalle vorgeschrieben, im Falle der hier beschriebenen Busmotoren wird das Standardintervall von 30000 km auf 15000 km verkürzt.

Untersuchung von SCR-Abgasnachbehandlungssystemen nach dem Feldtest

Untersuchung des 1. SCR-Katalysators

Der Wirkungsgrad des SCR-Systems wurde bei verschiedenen Temperaturen und Raumgeschwindigkeit vermessen. Die Ergebnisse werden in Abbildung 9 für eine Katalysatortemperatur von 280 °C, in Abbildung 10 für eine Katalysatortemperatur von 330 °C und in Abbildung 11 für eine Katalysatortemperatur von 450 °C dargestellt.

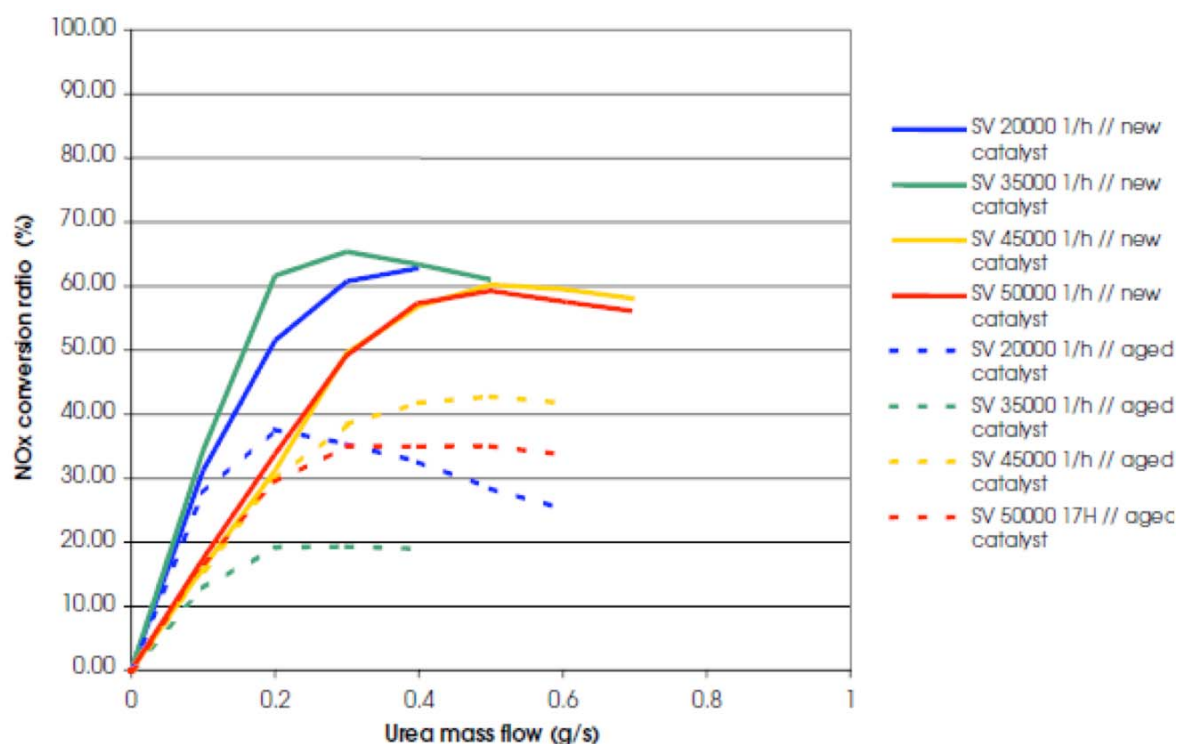


Abbildung 9: SCR-Wirkungsgrad bei 280 °C SCR-Katalysator-Eintrittstemperatur

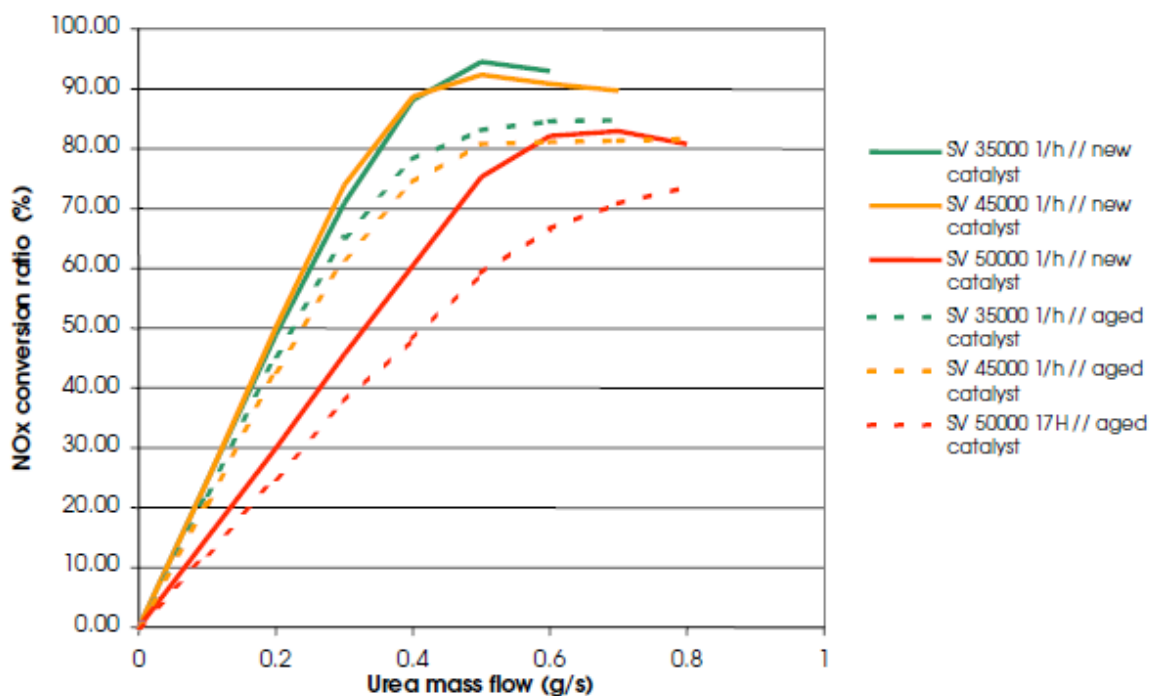


Abbildung 10: SCR-Wirkungsgrad bei 330 °C SCR-Katalysator-Eintrittstemperatur

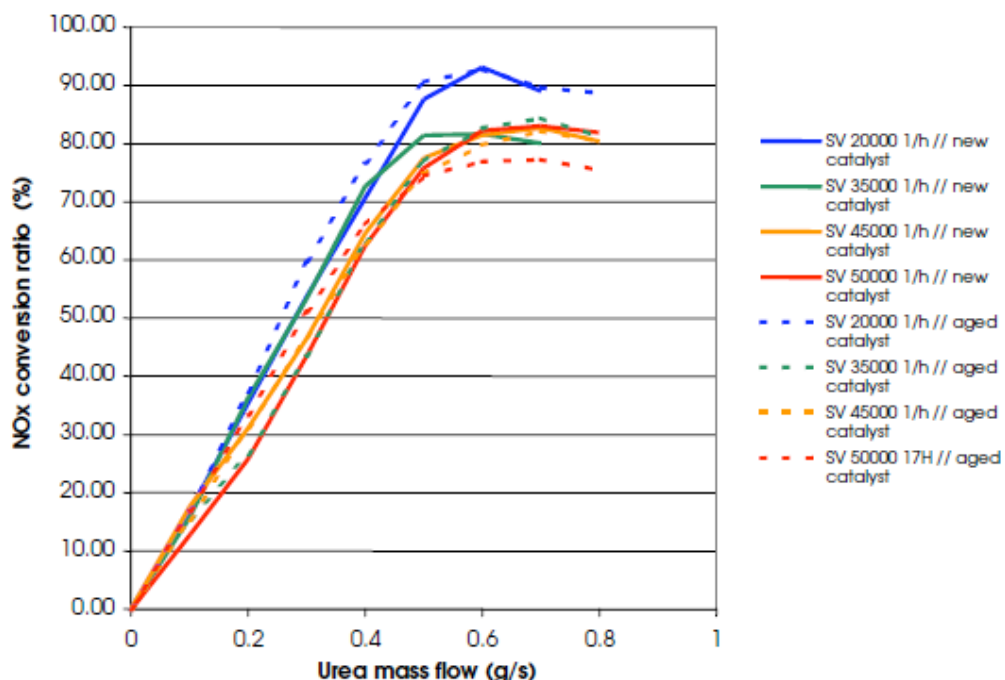


Abbildung 11: SCR-Wirkungsgrad bei 450 °C SCR-Katalysator-Eintrittstemperatur

Während bei den Temperaturen 330 und 450 °C die Wirkungsgrade für den Feldtest-Katalysator 1 weitgehend unverändert sind gegenüber einem neuen Katalysator, sind bei der niedrigeren Abgastemperatur von 280 °C deutlich reduzierte Wirkungsgrade von ca. 50 % zu beobachten.

Während zunächst vermutet wurde, dass dieses Nachlassen der Wirkung durch Kalium und Natrium bedingt sein könnte, welche als Bestandteile von Biodiesel vorkommen und welche bekanntermaßen SCR-Katalysatoren vergiften können. Im weiteren Verlauf der Messungen stellte sich allerdings heraus, dass die volle Wirkung des Katalysators wieder hergestellt werden konnte, nachdem der Katalysator über längere Zeit hohen Abgastemperaturen ausgesetzt wurde. Da eine chemische Vergiftung durch anorganische Elemente wie Kalium und Natrium nicht durch hohe Temperatur rückgängig gemacht werden kann, musste nach einer anderen Erklärung für den Abfall der Niedrigtemperatur-Aktivität gesucht werden: Wahrscheinlich hat aufgrund der niedrigen Auslastung und niedrigen Abgastemperatur im Busbetrieb eine Verkokung unverbrannter Biodieselbestandteile am SCR-Katalysator stattgefunden. Wegen der reaktiven Doppelbindungen im Molekül sind solche Verkokungen bei Biodiesel leichter möglich als bei Dieselkraftstoff.

Untersuchung des 2. SCR-Katalysators

Auch der 2. Katalysator wurde bei verschiedenen Abgastemperaturen und Raumgeschwindigkeiten auf den Wirkungsgrad der Stickoxid-Absenkung untersucht. Allerdings zeigte dieser Katalysator keine Einbußen der Wirksamkeit, sogar bei der noch niedrigen untersuchten Abgastemperatur von 250 °C:

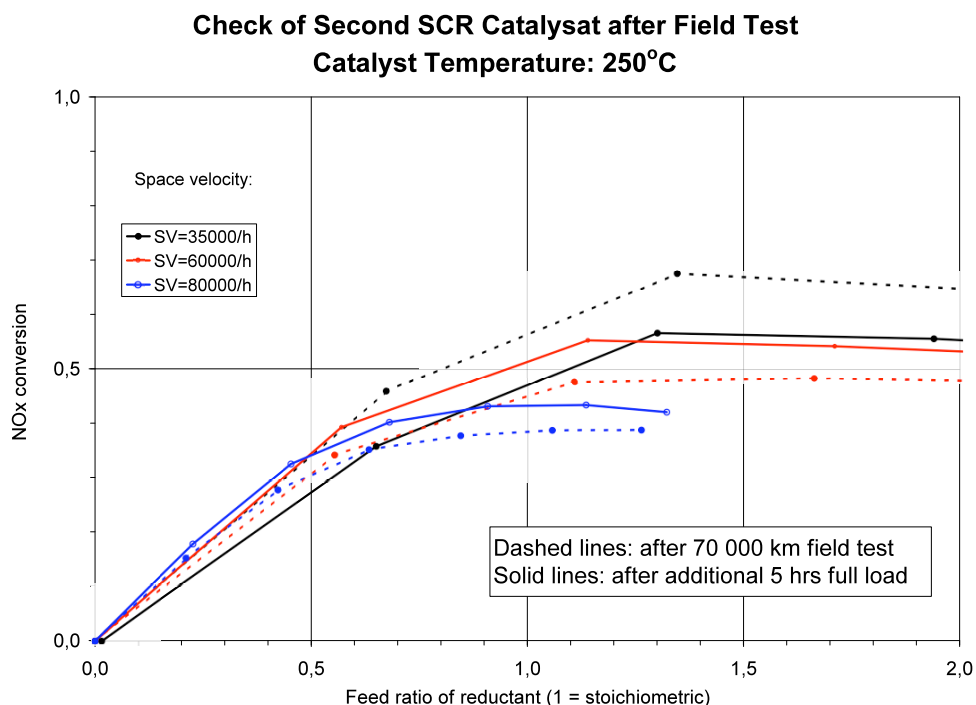


Abbildung 12: SCR-Wirkungsgrad bei 250 °C SCR-Katalysator-Eintrittstemperatur

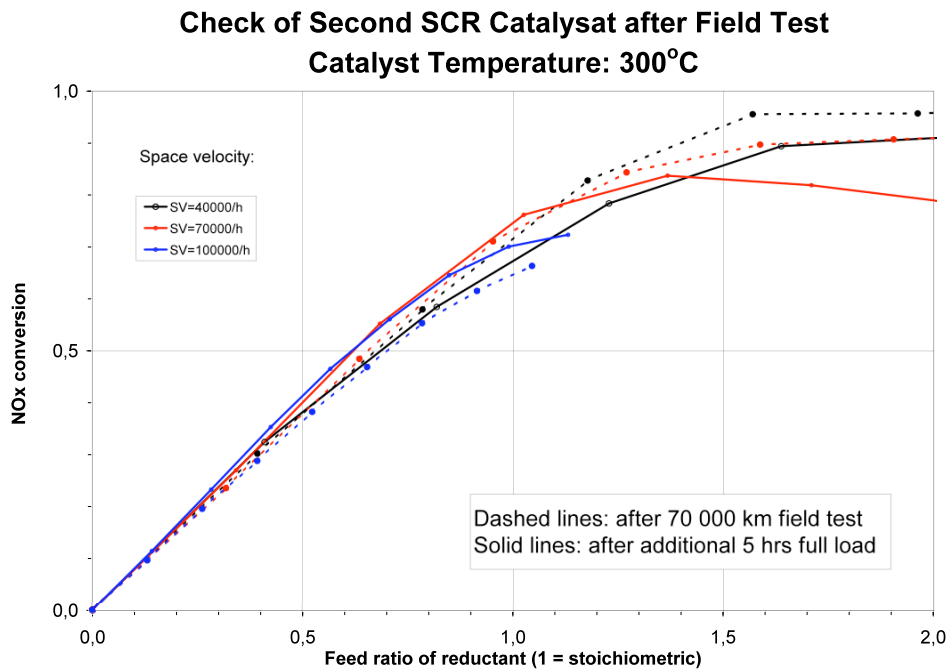


Abbildung 13: SCR-Wirkungsgrad bei 300 °C SCR-Katalysator-Eintrittstemperatur

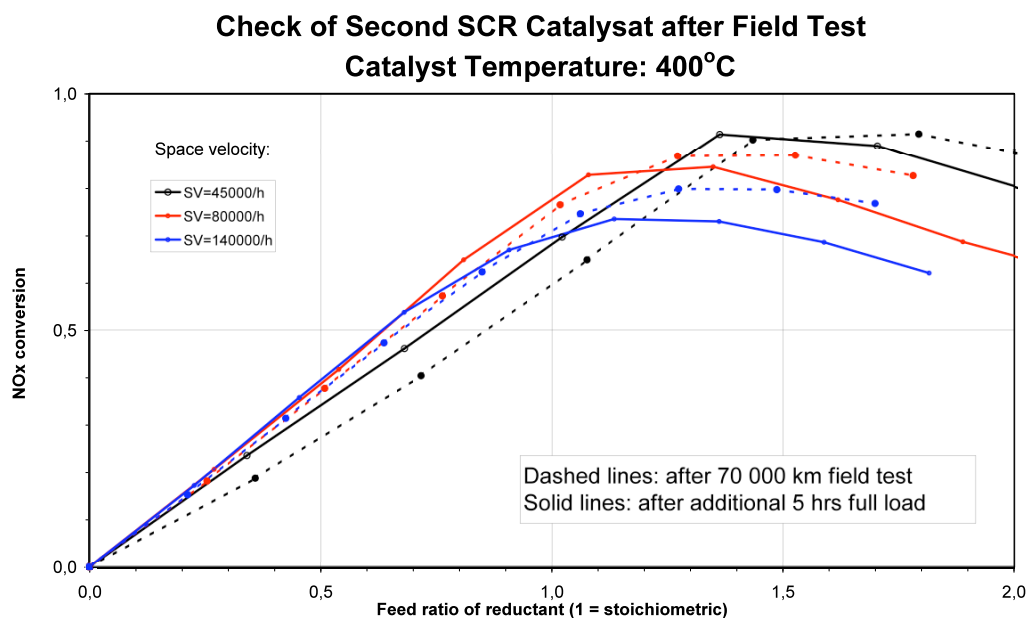


Abbildung 14: SCR-Wirkungsgrad bei 400 °C SCR-Katalysator-Eintrittstemperatur

Zusätzlich zu diesen systematischen Untersuchungen des SCR-Wirkungsgrades wurden noch die Emissionen nach SCR-Katalysator im ESC-Test gemessen, um die Einhaltung der EURO V-Grenzwerte zu überprüfen. Es wurde eine NO_x-Emission von 1,80 g/kWh gemessen und somit der Grenzwert von 2,0 g/kWh deutlich unterschritten:

	Nitrogen oxides NO _x	Hydrocarbons HC	Carbon monoxide CO
	g/kWh	g/kWh	g/kWh
before SCR catalyst	7,35	0,025	0,096
after SCR catalyst	1,80	0,01	0,065
SCR catalyst efficiency, %	-75,5	-60,0	-32,3

Die folgende Abbildung 15 zeigt die NO_x-Emissionen vor und nach Katalysator sowie die SCR-Wirkungsgrade für die 13 Betriebspunkte des ESC:

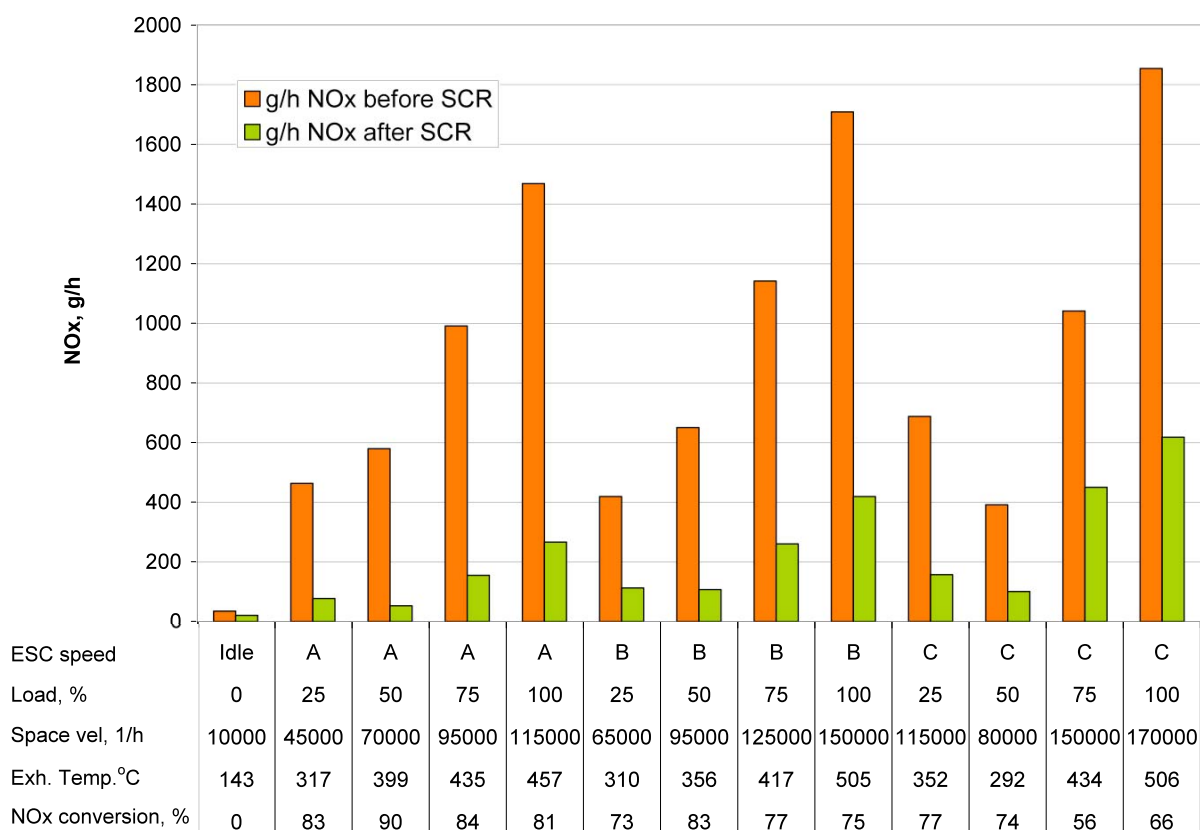


Abbildung 15: NO_x-Emissionen vor und nach Katalysator sowie die SCR-Wirkungsgrade im ESC

Die Gefahr der Vergiftung von SCR-Katalysatoren durch Kalium und Natrium

Die SCR-Abgasnachbehandlung ist für die Reduzierung der Stickoxidemission bei EURO IV und EURO V die Technologie der Wahl. Hier stehen bestimmte anorganische Elemente mit basischen Eigenschaften, vor allem Kalium und Natrium, im Verdacht, die sauren Reaktionszentren des SCR-Katalysators zu neutralisieren und somit den Wirkungsgrad zu verschlechtern.

Aktuell werden hier bei der FVV verschiedene Projekte zum Thema Katalysatorvergiftung und Deaktivierung durchgeführt [5,6]. Auch in der Literatur wird die Vergiftung von SCR-Katalysatoren durch Metalle verschiedentlich beschrieben, und gerade basische Elemente wie Kalium und Natrium zeigen eine besonders hohen Vergiftungseffekt:

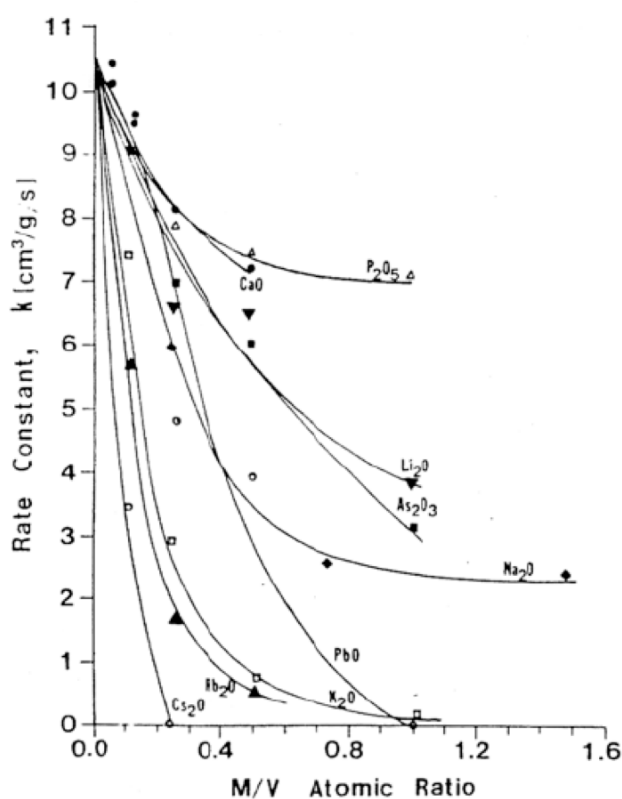


Figure 2.5 Activities of 5% V_2O_5/TiO_2 doped with different amount of metal oxide poisons
M=metal, 300 °C, $O_2=2\%$, $NO=NH_3=1000$ ppm, $N_2=$ balance, $GHSV=15000hr^{-1}$
(Chen and Yang, 1990)

Abbildung 16: Beeinflussung des SCR-Wirkungsgrades durch verschiedene Katalysatorgifte [7]

Es wurde versucht, auf Basis der Literatur-Kenntnisse zur SCR-Vergiftung, der in den SCR-Katalysatoren des Feldtests gefunden Mengen an Vergiftungskomponenten und der im Biodiesel des Feldtests gefunden Mengen an Vergiftungskomponenten abzuschätzen, wie hoch die Gefahr der SCR-Vergiftung durch Biodiesel ist. Hierzu wurde das folgende Berechnungsverfahren angewendet, in dem aus den Elementkonzentrationen in den Betriebsstoffen (Kraftstoff und Schmieröl) und den Verbräuchen dieser Betriebsstoffe die Emissionen der Elemente und unter Annahme eines Rückhaltegrades im Katalysator von 10 % die im Katalysator während einer bestimmten Laufzeit angesammelten Anteile dieser Elemente im Washcoat berechnet werden. Die folgende Rechnung wurde für den 70000 km-Feldtest durchgeführt und enthält auch die Elementkonzentrationen von 3 Biodieselproben, die während des Feldtests genommen wurden:

**Field test TCD2013L06-4V (Bus, IOV) for Biodiesel release
Accumulation of poisons K, Na, Ca and Mg in SCR catalyst**

		Vehicle speed, km/h	25			
Engine	Engine power	kW	213	Mileage, km		70000
	Average engine load	%	20	Operation time, h		2800
Fuel	Fuel consumption	g/kWh	248,6	Biodiesel analysis		
	Fuel consumption, absolute	kg/h	10,6	Sample 1	Sample 2	Sample 3
	Sodium content fuel	mg/kg		0,27	0,28	1,33
	Potassium content fuel	mg/kg		0,44	0,87	0,89
	Calcium content fuel	mg/kg		0,14	0,16	0,22
	Magnesium content fuel	mg/kg		0,13	0,14	0,19
	Phosphor content fuel	mg/kg		0,40	1,80	0,16
Lube oil	Oil consumption	% of fuel consumption	0,05	Calculation results mg/h		
	Calcium content lube oil	mg/kg	4000	2,9	2,9	14,1
	Phosphor content lube oil	mg/kg	1200	4,7	9,2	9,4
	Oil consumption absolute	g/h	5,30	1,5	1,7	2,4
Element intake into catalyst, mg/h				14,8		
Na	Sodium from fuel	mg/h		4,2	19,1	1,7
K	Potassium from fuel	mg/h		4,4		
Ca	Calcium from fuel	mg/h		Calculated % Na... in washcoat		
Ca	Calcium from lube oil	mg/h		0,03	0,03	0,13
P	Phosphorus from fuel	mg/h		0,04	0,08	0,08
P	Phosphorus from lube oil	mg/h		0,15	0,15	0,15
Washcoat mass SCR catalyst		g	3110			
Element retention within SCR washcoat		%	10			
Na	Sodium im SCR washcoat after 70000 km	% mass				
K	Potassium im SCR washcoat after 70000 km	% mass				
Ca	Calcium im SCR washcoat after after 70000 km	% mass				

Abbildung 17: Berechnung der Akkumulation verschiedener Elemente im SCR-Katalysator im Busfeldtest

Es ergeben sich Konzentrationen von 0,03-0,13 Massen-% Na und K im Washcoat. Dies ist im Mittel etwas niedriger als die tatsächlich im Washcoat des Feldtest-Katalysators 1 analysierten Elementanteile von Na und K, welche bei ca. 0,1 Massen-% lagen.

Dabei ist noch zu erwähnen, dass Analysen von drei Kraftstoffproben des verwendeten Biodiesels relativ geringe Werte für Kalium und Natrium aufwiesen (jeweils 0,3–1,3 mg/kg), also deutlich unterhalb des Grenzwertes.

Die folgende Tabelle zeigt die gleiche Rechnung, aber jetzt für die ungünstigeren Verhältnisse eines Lkw-Betriebs mit höherer Auslastung und längerer Laufleistung von 500000 km:

Accumulation of poisons K, Na, Ca and Mg in SCR catalyst Extrapolation to 500000 km Truck operation with Biodiesel

Engine	Engine power	kW	213	Vehicle speed, km/h	65		
	Average engine load	%	45	Mileage, km	500000		
	Fuel consumption	g/kWh	248,6	Operation time, h	7692		
	Fuel consumption, absolute	kg/h	23,8	Biodiesel analysis			
Fuel composition	Na, Sodium	mg/kg		Sample 1	Sample 2	Sample 3	
	K, Potassium	mg/kg		0,27	0,28	1,33	
	Ca, Calcium	mg/kg		0,44	0,87	0,89	
	Mg, Magnesium	mg/kg		0,14	0,16	0,22	
	P, Phosphorous	mg/kg		0,13	0,14	0,19	
Lube oil	Oil consumption	% of fuel consumption	0,05	0,40	1,80	0,16	
	Calcium content lube oil	mg/kg	4000	Calculation results mg/h			
	Phosphor content lube oil	mg/kg	1200	6,5	6,6	31,7	
	Oil consumption absolute	g/h	11,91	10,5	20,7	21,2	
Element intake into catalyst, mg/h				3,4	3,7	5,3	
Na	Sodium from fuel	mg/h		33,4			
K	Potassium from fuel	mg/h		9,5	42,9	3,8	
Ca	Calcium from fuel	mg/h		10,0			
Ca	Calcium from lube oil	mg/h		Calculated % Na... in washcoat			
P	Phosphorus from fuel	mg/h		0,32	0,33	1,57	
P	Phosphorus from lube oil	mg/h		0,52	1,03	1,05	
Washcoat mass SCR catalyst			3110	1,82	1,84	1,91	
Element retention within SCR washcoat			20				
Na	Sodium im SCR washcoat after 700000 km	% mass					
K	Potassium im SCR washcoat after 700000 km	% mass					
Ca	Calcium im SCR washcoat after after 700000 km	% mass					
Angaben Umicore für Washcoatmengen:							
Allgemein: 10-200 g/l							
DOC, DPF : < 100 g/l							
SCR : 100-200 g / l							
Volumen SCR-Katalysator			l	12,44			
Washcoat-Menge SCR-Katalysator			g/l	250			
Masse Washcoat SCR-Katalysator			g	3110			

Abbildung 18: Berechnung der Akkumulation verschiedener Elemente im SCR-Katalysator im Truckeinsatz

Während die Berechnungsergebnisse für die 70000 km Busbetrieb noch als unverdächtig anzusehen sind, kann man dies für den Lkw-Betrieb über 500000 km nicht mehr behaupten. Aufgrund der Literaturergebnisse ist für die berechneten angesammelten Element-Mengen mit einer deutlichen SCR-Deaktivierung über so lange Laufzeiten zu rechnen. Allerdings ist auch darauf hinzuweisen, dass nicht alle für die Berechnung getroffenen Annahmen abgesichert sind, insbesondere die Rückhalterate der Elemente im Katalysator ist ein reiner Schätzwert, ferner wurde der Elementeintrag nur durch Kraftstoff-Analysen mit 3 Stichproben und nicht detaillierter vermessen. Aus der Tatsache, dass bisher keine konkreten Vergiftungen von SCR-Katalysatoren in Nutzfahrzeugen mit Biodieselbetrieb publik geworden sind, lässt sich die Hoffnung ableiten, dass Katalysator-Vergiftungen in der Praxis nicht in dem Maß vorkommen, in dem sie anhand die hier dargestellten Untersuchungsergebnisse möglich erscheinen.

Dennoch besteht hier weiterer Forschungsbedarf, um letztendlich sicherstellen zu können, dass anorganische Elemente aus dem Biodiesel nicht zu einer dauerhaften Schädigung der Abgasnachbehandlung und somit zu einer Nichteinhaltung der Emissionen über den gesamten Lebenszyklus des Motors führen.

Eine weitere Absenkung der entscheidenden anorganischen Inhaltsstoffe (Na, K, P, Ca, Mg) und Anpassung der bestehenden Norm EN 14214 ist unbedingt notwendig, um das potentielle Risiko zu mindern [8]. Auch in den Europäischen und nationalen Dieselmotornormung EN 590 [9] bzw. DIN 51628 [10] sollen entsprechende Element-Grenzwerte eingeführt werden.

Biodieselsensor

Die Überprüfungen der Sensorfunktionen im Labor erfolgte mit Kalibrier-Mischungen aus Dieselmotorkraftstoff und Biodiesel. Danach wurde der Sensor in einem der beiden Feldtest-Busse in Ilmenau eingebaut und die Messdaten während des Feldtests aufgezeichnet. Nachdem der Sensor anfänglich korrekte Werte bei der Biodieselmotorkonzentration (annähernd 100 Vol-%) und der Temperatur (30-40 °C) anzeigte, wurden im weiteren Verlauf unplausible Messwerte und plötzliche Sprünge beobachtet. Aufgrund des fehlerhaften Sensors konnten weiterführende Laborversuche nicht mehr durchgeführt werden.

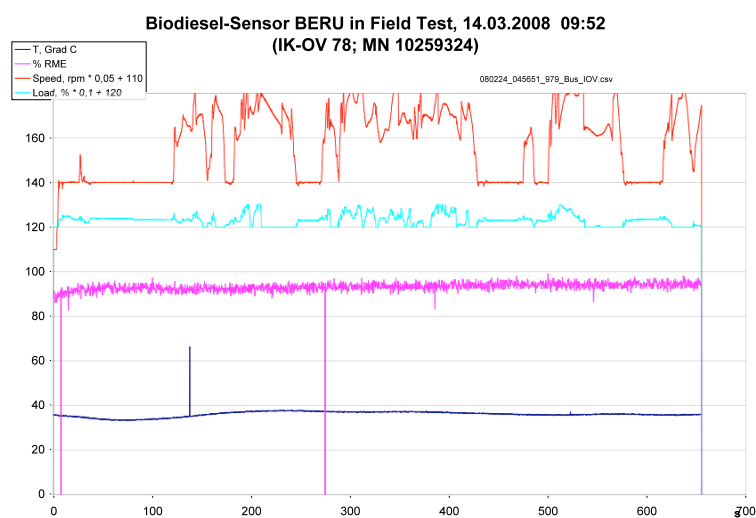


Abbildung 19: Sensor-Signale in Ordnung (100 % Biodieselmotorkonzentration wird korrekt erkannt)

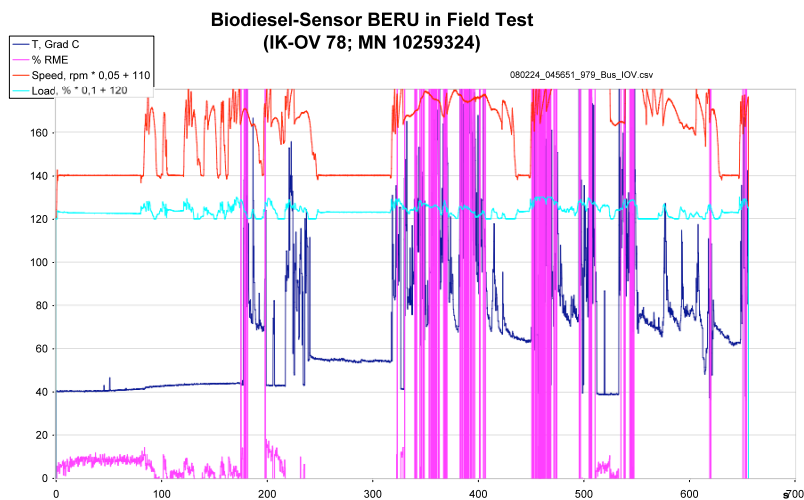


Abbildung 20: Sensor-Signale fehlerhaft, Messwerte unsinnig

Zusammenfassung

Eine Freigabe des Nutzfahrzeugmotors TCD2013 L04/06-4V für den Betrieb mit 100 % Biodiesel (B100) wäre zwar hinsichtlich des Basismotors möglich, aber das Gesamtsystem EURO IV/EURO V inklusive Abgasnachbehandlung und OBD-System kann aus den folgenden Gründen z.Zt. nicht freigegeben werden:

- Mögliche SCR-Vergiftung durch Kalium und Natrium
 - Die durchgeführten Untersuchungen haben zwar keinen direkten Hinweis auf eine Vergiftung gezeigt. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen und Berechnungen kann jedoch für längere Betriebszeiten eine signifikante Vergiftung nicht ausgeschlossen werden.
- Probleme mit OBD
 - Das OBD-System kann bei Biodieselbetrieb Fehlermeldungen produzieren, die auf der vorliegenden Minderleistung beruhen. Diese Erkenntnis stammt nicht aus dem Feldtest mit den Busmotoren sondern aus grundsätzlichen Untersuchungen an Lkw's. Um diese Fehlermeldungen auszuschließen, müsste über einen Sensor erkannt werden, dass Biodiesel verwendet wird. Ein Biodieselsensor ist aber noch nicht serienmäßig verfügbar. Bei den Untersuchungen wurde weiter festgestellt, dass mit einer 30 %-Biodiesel-Mischung die OBD-Funktion nicht anspricht.

Für den Betrieb mit 30 % Biodiesel (B30) wird der Nutzfahrzeugmotor TCD2013 L04/06-4V hingegen freigegeben, allerdings unter der Maßgabe, dass der SCR-Katalysator nach jeweils 200000 km auszutauschen ist.

Folgende Randbedingungen sind zu beachten:

Durch die Nutzung von FAME ist eine Reduzierung der Leistung von ca. 9 % in Kauf zu nehmen. Eine Anpassung der Einspritzmenge ist nicht zulässig. Lackschäden im Falle von FAME-Benetzungen sind zu tolerieren. Aufgrund des erhöhten Biodieseleintrags in das Motorenöl insbesondere bei Motoren mit niedriger Auslastung ist das Ölwechselintervall zu halbieren (im Traktor von 500 auf 250 h, im Stadtbuseinsatz von 30000 auf 15000 km, im Truceinsatz von 60000 km auf 30000 km). Die Verwendung von FAME-resistenten Bauteilen im Kraftstoffsystem wird vorausgesetzt. Als minimale Kaltstarttemperatur wird -15 °C festgelegt.

Um zukünftig für die Nutzfahrzeugmotoren auch mit 100% Biodiesel eine Freigabe erreichen zu können, müssen folgende Punkte gelöst werden:

- Ansprechen der OBD durch Minderleistung beim Biodieseleinsatz
- Serientauglichkeit von Biodieselsensoren
 - Der Verzicht auf Biodieselsensoren ist aus Sicht von DEUTZ nur bis zu einem FAME-Anteil von 30 Vol-% (B30) möglich.
- Dieselkatalysatordeaktivierung durch Alkalielemente und andere Katalysatorgifte
- DPF-Beladung durch aschebildende Elemente

Die hier dargestellten Freigaben werden in der Neufassung (8.Auflage) des Technischen Rundschreibens TR 0199-99-3005 "Kraftstoffe" eingearbeitet und im Februar 2010 veröffentlicht.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 14214:
Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Fettsäure-Methylester (FAME) für Dieselmotoren – Anforderungen und Prüfverfahren.
Beuth Verlag, Berlin (Ausgabe November 2003)
- [2] Technisches Rundschreiben 0199-99-3005:
Kraftstoffe. Deutz Dokumentation, Ausgabe Oktober 2008 (7.Austausch)
- [3] Munack et al:
Erkennung des RME-Betriebes mittels eines Biodieselmotoren-Sensors
FAL-Bericht, Sonderheft 257, Braunschweig (2003)
- [4] Entwicklungsspezifikation SE 0163 5005:
Motoren – Standard-Dauerlauf (Programmlauf)
Deutz Dokumentation, Ausgabe Nov. 2005
- [5] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV):
Dieselkatalysatordeaktivierung –
Chemische Desaktivierung von SCR –Nachbehandlung von Dieselaabgasen.
Vorhaben Nr. 882, Informationstagung Frankfurt 2008
- [6] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV):
Dieselkatalysatordeaktivierung II –
Deaktivierung von Nachbehandlungssystemen für EURO IV und EURO V.
Vorhaben Nr. 957, Informationstagung Bad Neuenahr 2009
- [7] Xiaoyu Guo:
Poisoning and sulfation on vanadia SCR catalyst.
Brigham Young University, August 2006
- [8] Nicole Cygon:
Einsatz einer Verbrennungskraftmaschine in landtechnischer Applikation unter
Verwendung von Biokraftstoffen am Beispiel eines 4-Takt Dieselmotors in
Anlehnung an die heutigen und zukünftigen Abgasemissionsrichtlinien.
Rheinische Fachhochschule Köln, Diplomarbeit 2008
- [9] DIN EN 590:
Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Dieselmotoren – Anforderungen und Prüfverfahren.
Beuth Verlag, Berlin (Ausgabe Oktober 2009)
- [10] DIN 51628:
Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Anforderungen und Prüfverfahren – Dieselmotoren B7.
Beuth Verlag, Berlin (Ausgabe August 2008)