

# ATZ **extra**



**Betriebsverhalten eines Traktormotors  
der Abgasstufe EU IV im Biodieselbetrieb**

**uföp**

AUTOREN



**Dipl.-Ing. Thomas Sadlowski**  
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock.



**Dr.-Ing. Volker Wichmann**  
ist Leiter der Arbeitsgruppe Motorenversuche am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock.



**Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz**  
ist Leiter des Lehrstuhls für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock.



**Dipl.-Ing. Markus Winkler**  
ist verantwortlich für Betriebsstoffe und biogene Kraftstoffe bei der Deutz AG in Köln.

# Betriebsverhalten eines Traktormotors der Abgasstufe EU IV im Biodieselbetrieb

Der Einsatz von Bioreinkraftstoffen in landwirtschaftlich genutzten Maschinen, die zum großen Teil über Eigenverbrauchstankstellen versorgt werden, bietet die Möglichkeit, den Einsatz von fossilen Kraftstoffen zu reduzieren. Mit der Einführung neuer Abgasnormen zu Beginn des Jahrzehnts wurde festgelegt, dass die Motoren nicht nur mit dem Testkraftstoff, sondern mit allen Kraftstoffen, mit denen sie betrieben werden dürfen, die Abgasgrenzwerte einhalten müssen. Am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock wurde untersucht, inwieweit moderne Dieselmotoren für Landmaschinen für den Langzeitbetrieb mit Biodieselskraftstoff gemäß EN 14214 geeignet sind.



1	MOTIVATION
2	AUFBAU UND MESSTECHNIK DER MOTORVERSUCHE
3	ERGEBNISSE
4	ZUSAMMENFASSUNG

## 1 MOTIVATION

Zum Antrieb von Fahrzeugen werden aufgrund ihrer hohen Energiedichte hauptsächlich flüssige Kraftstoffe, vorrangig fossilen Ursprungs, eingesetzt. Um die Abhängigkeit vom Erdöl und gleichzeitig die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, wird seit vielen Jahren an alternativen und regenerativen Kraftstoffen geforscht. Die EU-Kommission verfolgt mit ihrem Aktionsplan zur Förderung von Biokraftstoffen das Ziel, bis zum Jahr 2020 10 % der europaweit eingesetzten konventionellen Kraftstoffe durch biogene Kraftstoffe zu ersetzen. Auch die Richtlinie 2009/28/EG fordert einen Anteil von 10 % erneuerbarer Energien im Verkehrssektor, wobei davon 5 % aus Reststoffen wie beispielsweise Altölen produziert sein sollen [1].

Ein Flottenbetrieb mit 100 % Biodiesel (B100) im Agrarsektor ist ein Weg, der nennenswert zur Erfüllung der Quotenverpflichtung beitragen kann. Daher sollte in diesem Vorhaben der prinzipielle Nachweis für die Eignung von B100 für den Betrieb von Serienmotoren der Abgasstufe EU IV (non-road) für Industrie- und Landtechnik an einem typischen landwirtschaftlich genutzten Motor Deutz TCD 3.6 erbracht werden.

Dabei wurden primär mögliche Deaktivierungen des Abgasnachbehandlungssystems (AGN-System) aufgrund von Kraftstoffspurenelementen (P, K, Na, Ca, Mg) im Langzeitbetrieb untersucht. Detaillierte Analysen des Dieselpartikelfilters (DPF) beinhalteten die Untersuchung der Beladung und der kontinuierlichen Regeneration mittels des durch NO<sub>2</sub> getragenen CRT-Effekts. Damit ein störungsfreier Betrieb für den Endnutzer mit B100 realisiert werden kann, wurde auch die Funktion der On-Board-Diagnose (OBD) überprüft.

Das Forschungsvorhaben hatte folgende Schwerpunkte: Zunächst erfolgte eine umfangreiche Grundvermessung des Motors im stationären Betrieb (C1-Zyklus gemäß ISO 8178 und ausgesuchte stationäre Lastpunkte) mit Referenz-Dieselmotorkraftstoff (DK, DIN EN 590) und Biodiesel (DIN EN 14214). Der Einfluss

Parameter	Einheit	Daten
Nennleistung	kW	100 bei 2200/min
Maximales Drehmoment	Nm	500 bei 1600/min
Hubraum	l	3,6
Hub	mm	120
Bohrung	mm	98
Kraftstofffreigabe	-	DIN EN 590
Einspritzsystem	-	CR mit maximal 1600 bar
AGR	-	Gekühlte Hochdruck-AGR
AGN	-	DOC, DPF, SCR, ASC
Abgasstufe	-	EU IV
Motoröl	-	Qualitätsklasse Deutz DQC IV-10 LA

**TABELLE 1** Technische Daten des Vierzylinder-Versuchsmotors Deutz TCD 3.6 (© Deutz)

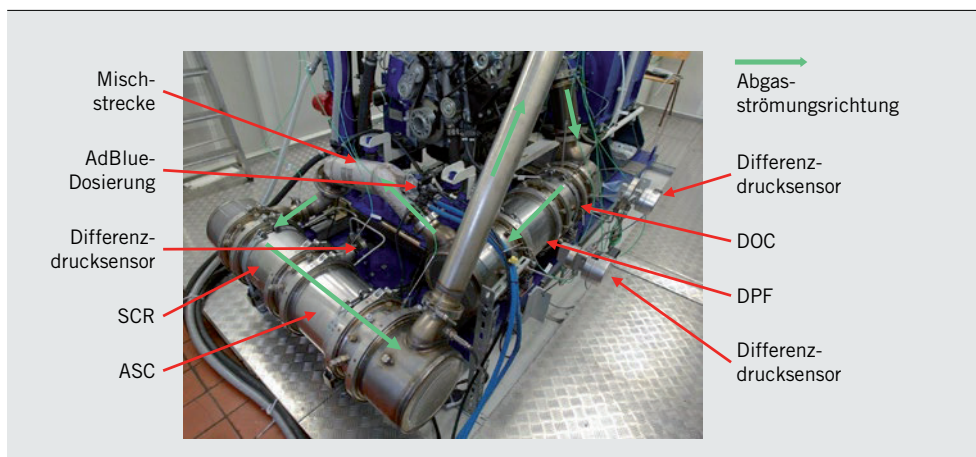
auf die Funktionalität des Abgasnachbehandlungssystems wurde dabei ebenfalls aufgezeichnet und analysiert. Des Weiteren sollte ein Dauerlauf von 1000 Betriebsstunden einen Aufschluss über die Langzeithaltbarkeit des Motors und dessen AGN-System geben.

Gesamtziel des Projekts war es, allgemeine wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen, ob und unter welchen Bedingungen moderne Landmaschinen der Abgasgesetzgebungsstufe EU IV mit Biodiesel betrieben werden können, damit geeignete und erprobte Antriebsaggregate zeitnah für den Einsatz von B100 in der Landwirtschaft zur Verfügung stehen.

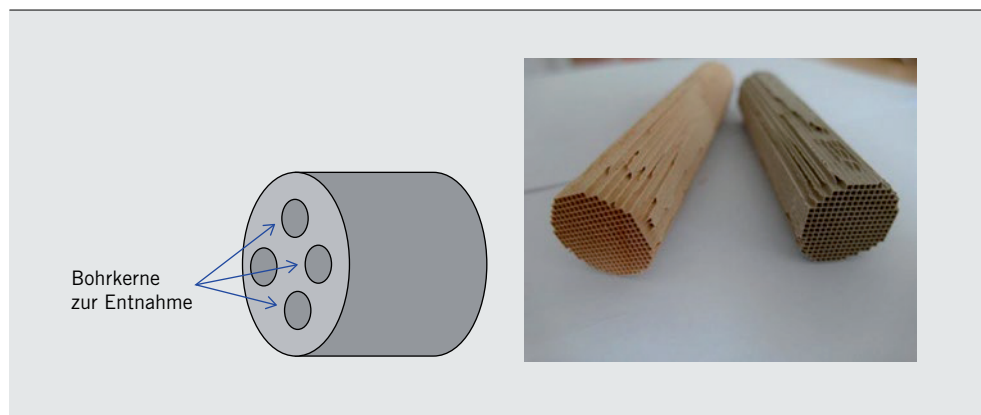
## 2 AUFBAU UND MESSTECHNIK DER MOTORVERSUCHE

Für die Motorversuche wurde ein Serienmotor TCD 3.6 auf einem Motorprüfstand mit den genannten Kraftstoffen betrieben. Im Motorsteuergerät wurde keine Anpassung an die Kraftstoffe vorgenommen, um die Einflüsse des Kraftstoffs auf den Serienmotor zu analysieren. Die technischen Daten des Prüflings sind in **TABELLE 1** aufgeführt.

Der Motor besitzt ein zur Einhaltung der Abgasnorm entwickeltes Abgasnachbehandlungssystem des Katalysatorherstellers Umicore, bestehend aus einem Dieseloxydationskatalysator (DOC), einem DPF, einem selektiven katalytischen Reduktionskatalysator (SCR) und einem Ammoniak-Sperrkatalysator (ASC), **BILD 1**. Vor



**BILD 1** Aufbau des Abgasnachbehandlungssystems des Motors auf dem Prüfstand (© Universität Rostock)



**BILD 2** Darstellung der Bohrkernentnahme und Bohrkern vom DOC und SCR (© Universität Rostock)

dem SCR-Katalysator befindet sich die AdBlue-Dosierstrecke, bestehend aus Dosierventil, Zuleitungen und dem Tank mit Pumpe. Für die Durchmischung von Abgas und AdBlue wird eine Mischstrecke eingesetzt.

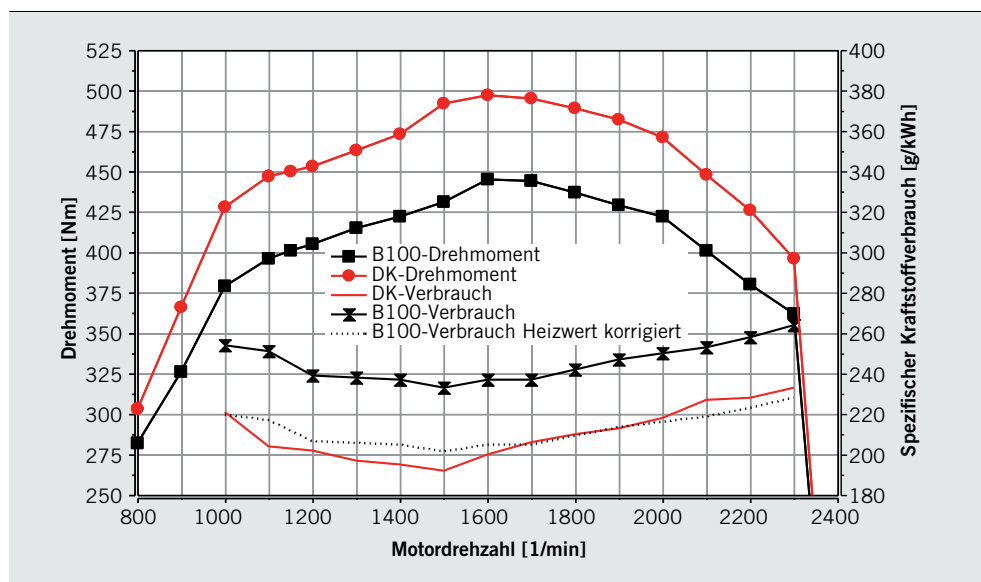
Die Komponenten sind in seriennahen Cannings modular aufgebaut. Zwischen den einzelnen AGN-Komponenten sind jeweils Zwischenringe zur Aufnahme der Messstellen angeordnet, die alle notwendigen Messstutzen für die Aufnahme der Temperatur-, Druck- und Abgasentnahmesonden enthalten. Die AGN-Komponenten und die Zwischenringe sind durch V-Band-Schellen miteinander verbunden, wodurch eine schnelle Montage und Demontage einzelner Komponenten ermöglicht wird. Der gewählte Aufbau des AGN-Systems dient den umfangreichen Untersuchungen des Kurz- und Langzeitverhaltens der einzelnen AGN-Bestandteile, insbesondere des DOC und des SCR, die so in regelmäßigen Abständen demontiert und bewertet werden konnten. Während des 1000-h-Dauerlaufs wurden nach festgelegten Intervallen Bohrkern entnommen und analysiert, **BILD 2**.

Für die Abgasanalysen wurden vier kommerzielle Abgasmessanlagen im Parallelbetrieb zeitsynchron bei einer Messrate von

1 Hz eingesetzt. Die Abgasentnahmestellen befinden sich nach der Turbine (ATL) vor DOC (Rohabgas), nach DOC/vor DPF, nach DPF/vor SCR und nach dem SCR-System (End-of-Pipe).

### 3 ERGEBNISSE

Zur Charakterisierung des Verhaltens des Motors wurden die Vollastkurve und das Motorkennfeld für den jeweiligen Kraftstoff B100 und DK aufgenommen. Diese Daten bilden die Messpunkte für den C1-Test ab, **BILD 3**. Durch den geringen Heizwert und der damit niedrigeren Energiedichte vom Biodiesel zeigt die Vollastkurve im B100-Betrieb ein etwas geringeres Drehmoment als im DK-Betrieb. Dies hat zur Folge, dass der Motor mit einer Lastpunkteverschiebung im Steuergerät auf den geringeren Heizwert reagiert, in dem der Momentenwunsch mit einer gesteigerten Kraftstoffmenge nachregelt wird. Damit ist ein Kraftstoffmehrverbrauch im Biodieselbetrieb zu erklären. **BILD 4** zeigt ebenfalls den gemessenen Kraftstoffverbrauch mit und ohne Heizwertkorrektur. Wird der Kraftstoffverbrauch mit dem Heizwert korrigiert, relativiert sich der spezifische Kraftstoffverbrauch von B100 zu DK.



**BILD 3** Drehmomentenkurve und Kraftstoffverbrauch von DK und B100 (© Universität Rostock)

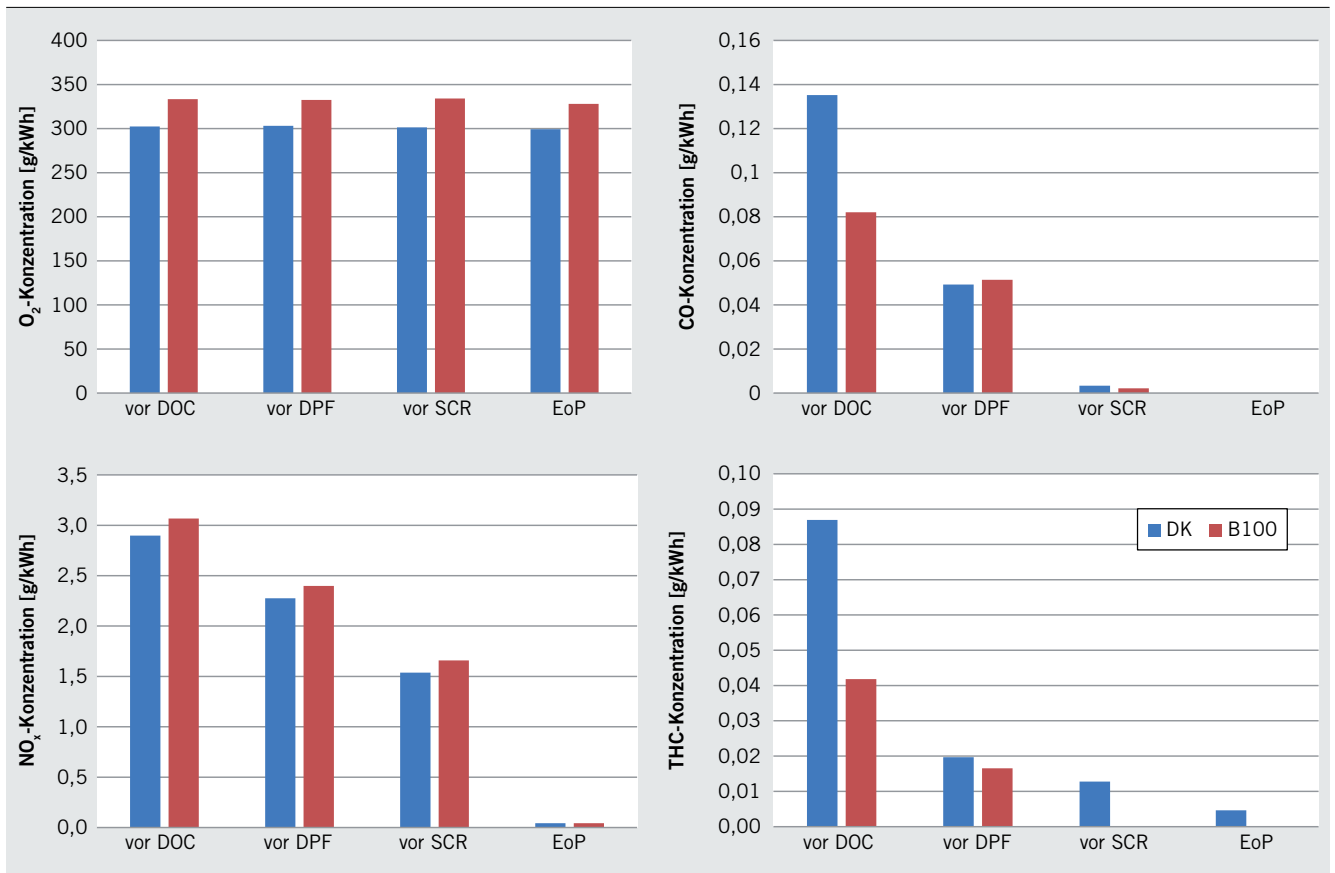


BILD 4 Abgaskonzentrationen für DK und B100 im Punkt 6 bei n = 1600/min und M = 370 Nm (© Universität Rostock)

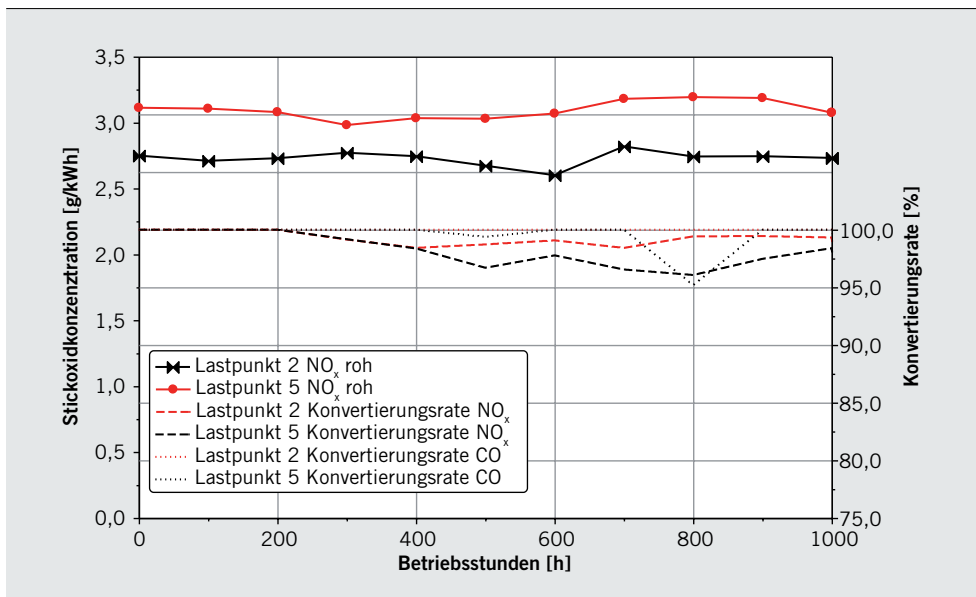


BILD 5 Stickoxidkonzentrationen und Konvertierungsraten über der Laufzeit von 1000 h im B100-Betrieb (© Universität Rostock)

Bedingt durch den gebundenen Sauerstoff im B100-Kraftstoff steigt die Sauerstoffkonzentration im Abgas. Des Weiteren bietet der zusätzliche Sauerstoff eine Verbesserung bei der Oxidation von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (THC) und Kohlenstoffmonoxid (CO). So konnte gezeigt werden, dass die CO- und THC-

Konzentrationen beim Biodiesel geringer sind als im DK-Betrieb. In BILD 5 ist exemplarisch ein Lastpunkt mit mittlerer Last und Drehzahl (n = 1600/min und M = 370 Nm) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Abgasmachbehandlungssystem zuverlässig arbeitet. Die Konvertierungsraten vom DOC und SCR liegen unab-

Emissionen	Einheit	DK	B100	B100 (nach 1000 h)	Grenzwert
CO	g/kWh	0,007	0,003	0,007	5,00
HC	g/kWh	0,026	0,011	0,030	0,19
NO <sub>x</sub>	g/kWh	0,114	0,127	0,190	0,40
Partikel	g/kWh	0,013	0,007	0,007	0,025

TABELLE 2 Spezifische Emissionen aus dem C1-Test mit Grenzwerten  
© Universität Rostock)

hängig vom Kraftstoff über 90 %. Die Konzentrationen von CO und THC befinden sich nach dem AGN-System (End-of-Pipe, EoP) an der Nachweisgrenze. Durch die nachgeschaltete Abgasnachbehandlung ist der Motor auch im B100-Betrieb in der Lage, die vorgeschriebene Abgasnorm EU IV mit einer erheblichen Reserve sicher einzuhalten, TABELLE 2.

Um Alterungsveränderungen hinsichtlich des Motorlaufs und des Abgasnachbehandlungssystems zu beurteilen, wurde ein Dauerlauf von 1000 Betriebsstunden im Biodieselpetrieb durchgeführt. In BILD 6 sind die Stickoxidkonzentrationen vom Rohabgas sowie die Konvertierungsraten von Stickoxiden und Kohlenstoffmonoxid exemplarisch für die Lastpunkte 2 (n = 2300/min, M = 310 Nm) und 5 (n = 1600/min, M = 442 Nm) über der Laufzeit von 1000 Betriebsstunden dargestellt. Es ist zu verzeichnen, dass keine relevanten Alterungserscheinungen im AGN-System über der Laufzeit im B100-Betrieb festgestellt wurden.

Des Weiteren wurden die während des 1000-h-Dauerlaufs entnommenen Bohrkern von Umicore untersucht. Als Erstes wurde die spezifische Oberfläche der Katalysatoren analysiert. Hierfür wurde eine BET-Analyse durchgeführt. BILD 6 zeigt die BET-Werte des SCR in Abhängigkeit der Betriebsstunden. Es ist zu erkennen, dass es keine Auffälligkeiten über der Laufzeit gibt. In einem weiteren Schritt wurden die Light-Offs zur Bestimmung des Umsatzverhaltens ermittelt. In BILD 7 sind der T50 sowie der T80-Wert für die NO<sub>x</sub>-Konvertierung dargestellt. Dabei steht T50 beziehungsweise T80 für die Temperatur, welche für eine NO<sub>x</sub>-Konvertierung von 50 beziehungsweise 80 % benötigt wird. Die blaue gestrichelte Linie (frisch T50) steht für die Temperatur für eine 50-%-Umsetzung der NO<sub>x</sub>-Emissionen im Ausgangszustand des SCR. Die rote gestrichelte Linie (30B600-T50) in der Mitte steht für eine hydrothermale Alterung des SCR bei 600 °C über 30 h und wird als Grenzwert betrachtet. Beim untersuchten Katalysator fällt diese Temperatur zusammen mit dem 80-%-Umsatzpunkt des frischen Katalysators (T80 (frisch)). Die obere rote gestrichelte Linie (30B600-T80) gibt den Grenzwert für einen

hydrothermal gealterten Katalysator bei einer Konvertierung von 80 % an.

Es ist zu sehen, dass sich die NO<sub>x</sub>-Performance (T50/T80) bis 800 h im Alterungsfenster befindet. Nach 800 h wird die Performance leicht unterschritten. Der Bohrkern von 1000 Betriebsstunden wurde anschließend zwei Regenerationen bei 600 °C für 30 min unterzogen. Dies hatte eine Performancesteigerung zur Folge, mit der das Alterungsfenster für T50 und T80 eingehalten werden konnte. An dieser Stelle soll erwähnt sein, dass bei dem Dauerlauf keine aktive Regeneration oder andere Heat-Modi betrieben wurden. Es wird davon ausgegangen, dass mit aktiven Regenerationsstrategien die Performance des SCR innerhalb des Alterungsfensters liegen würde.

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Um Dieselmotoren der neuesten Generation in Landmaschinen mit alternativen Kraftstoffen betreiben zu können, müssen die Motoren und ihre Abgasnachbehandlung für die Kraftstoffe freigegeben werden. Dies setzt entsprechende Motortests voraus. Am LKV der Universität Rostock wurden im Rahmen des Projekts grundlegende Tests mit mehr als 1700 Motorbetriebsstunden an einem Landtechnikmotor der Abgasstufe EU IV im B100 durchgeführt. Die Versuche dienten dem Ziel, den grundlegenden Nachweis der dauerhaften Eignung von EU-IV-Industrie-Dieselmotoren und deren Abgasnachbehandlungssystemen für den Betrieb mit Biodiesel beziehungsweise Biodieselblends zu erbringen. Als Referenz diente das Betriebs- und Emissionsverhalten des Versuchsträgers Deutz TCD 3.6 im Dieselpetrieb (DIN EN 590). Referenzpunkte waren die Vollastkurve sowie der stationäre C1-Test. Die anschließenden umfangreichen Untersuchungen mit Biodieselpetrieb fanden ohne Umbauten oder Softwareanpassungen des Motors statt.

Es konnte gezeigt werden, dass der Biodiesel bedingt durch den geringeren Heizwert einen Anstieg des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs zur Folge hat. Wird der Verbrauch mit dem Heizwert korrigiert, liegen die Unterschiede im Bereich der Messgenauigkeit. Mit der Veränderung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs ändert sich auch die Einspritzmenge je Arbeitsspiel, sodass beim Betrieb mit Biodiesel eine Verschiebung des Betriebspunkts im Motorsteuergerät festzustellen ist. Zum Beispiel wird der Einspritzzeitpunkt für die einzelnen Einspritzungen angepasst. In den Untersuchungen zeigte sich, dass sich der Biodiesel positiv auf die Zusammensetzung des Rohabgases (nach Zylinder, vor Abgasnachbehandlung) auswirkt. So erzeugt der Motor im Biodieselpetrieb geringere Kohlenstoffmonoxid-, Kohlenwasserstoffrohemi-

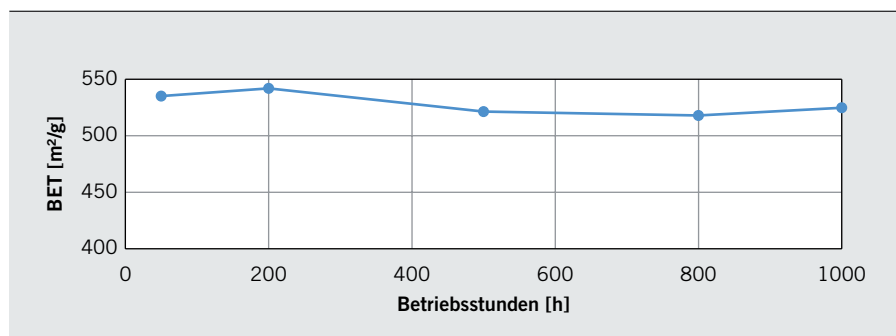
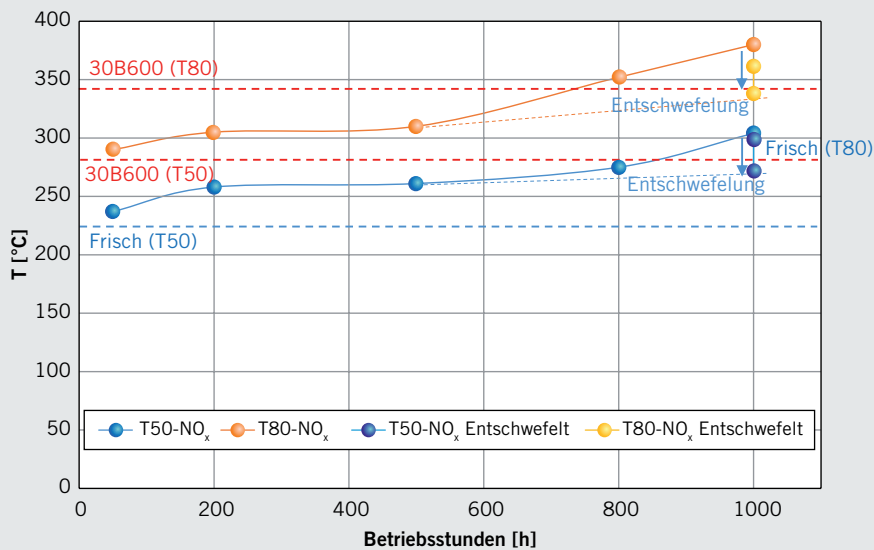


BILD 6 BET vom SCR über der Laufzeit von 1000 h © Universität Rostock)



**BILD 7** T50- und T80-Werte der SCR-Performance in Abhängigkeit der Laufzeit (© Universität Rostock)

sionen und Partikelemissionen im Vergleich zum Dieselbetrieb. Dieses Wissen ist von Bedeutung für eine potenzielle Biodieselapplikation des Partikelfilters. Im Vergleich zum Referenzbetrieb mit Diesel waren die Stickoxide im Rohabgas bei Biodieselbetrieb leicht erhöht, wie es auch bei früheren Motortests festgestellt werden konnte. Diese erhöhten Stickoxidemissionen im Rohabgas wurden durch den SCR-Katalysator sicher auf Werte unterhalb der EU-Stufe-IV-Grenzwerte reduziert. End-of-Pipe, dem für den Abgastest relevanten Messpunkt, konnten keine Unterschiede zwischen Dieselbetrieb und Biodieselbetrieb festgestellt werden. Beim Abgasnachbehandlungssystem, bestehend aus DOC, DPF und SCR-System, konnte auch im Biodieselbetrieb nach 1000 Betriebsstunden keine signifikante Änderung der Konvertierungsraten festgestellt werden, die Emissionen gemäß EU-Stufe IV wurden auch nach 1000 Betriebsstunden deutlich unterschritten. Primär mögliche Deaktivierungen des AGN-Systems, aufgrund von Kraftstoffspurenelementen (S, P, K, Na, Ca), wurden im Langzeitbetrieb und in der Post-Mortem-Analyse nicht festgestellt.

Detaillierte Analysen des DPF beinhalteten die Untersuchungen der Beladung und der kontinuierlichen Regeneration mittels des CRT-Effekts. Hier konnte gezeigt werden, dass sich bedingt durch eine Verminderung der Rauchzahlen (FSN) im B100-Betrieb auch die Beladung des DPFs verringert. Im üblichen Betrieb des Landmaschinenmotors erfolgt die Regeneration des DPFs sowohl im DK-, als auch im Biodieselbetrieb mittels CRT-Verfahren ohne zusätzliche Abgas-Heizstrategien (Heat-Modi). Die Untersuchungen zeigten, dass eine Stand-still-Regeneration des DPFs im Diesel- und Biodieselbetrieb wiederholt erfolgreich möglich ist. Dadurch kann gewährleistet werden, dass die hohe AGN-Performance über einen längeren Zeitraum bereitsteht. Die Weiterentwicklung der Gemischbildung in den letzten zehn Jahren führte zu einer deutlichen Verringerung des Kraftstoffeintrags in das Schmieröl beim Biodieselbetrieb.

Die positiven Projektergebnisse waren ein wesentlicher Baustein für die Freigabe der aktuellen Deutz-Motorenbaureihen für die Abgasstufe EU IV im Rahmen des technischen Rundschreibens

Kraftstoffe [2]. Da vergleichbare AGN-Systeme prinzipiell auch für Motoren der Abgasstufe EU V eingesetzt werden, erscheint auch hier eine B100-Freigabe grundsätzlich möglich.

#### LITERATURHINWEISE

[1] N. N.: Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG

[2] Winkler, M.; Rill, A.: Kraftstoffe. Deutz AG, TR 0199-99-01218, 4. Ausgabe, 17.11.2017

## DANKE

Das Forschungsvorhaben wurde am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren (LKV) der Universität Rostock unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf und Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz durchgeführt. Die Forschungsstelle bedankt sich für die Unterstützung durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) vertreten durch die Fachagentur Wachsende Rohstoffe e. V. Weiterer Dank gilt der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. und der Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e. V. Besonderer Dank gilt der Deutz AG und den Mitarbeitern Adrian Tröger (Mitarbeiter Abgasnachbehandlung) sowie Dipl.-Ing. Markus Winkler (verantwortlich für Betriebsstoffe und biogene Kraftstoffe).

#### IMPRESSUM:

Sonderausgabe 2018 in Kooperation mit Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP), Claire-Waldoff-Str. 7, 10117 Berlin; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden, Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE81148419

#### GESCHÄFTSFÜHRER:

Stefanie Burgmaier | Joachim Krieger | Juliane Ritt

HEAD OF CORPORATE SOLUTIONS: Markus Bereszewski

PROJEKTMANAGEMENT: Anja Trabusch

TITELBILD: © photoschmidt/Shutterstock.com