



Test zur Belagsbildungsneigung von Dieselkraftstoffen in Injektoren

© am | stock.adobe.com

Interne Ablagerungen in Dieselinjektoren können zu Motorbetriebsproblemen beziehungsweise einem veränderten dynamischen Verhalten von Injektoren führen. Hierbei stehen Common-Rail-Injektoren für Heavy-Duty-Motoren wegen ihren speziellen Anforderungen besonders im Fokus der Betrachtungen. Gerade diese Motoren sind gekennzeichnet durch Anwendungen mit höchsten Raildrücken, einem hohen Anteil an Hochlastbetrieb und Einsatzfelder in unterschiedlichsten Regionen und Märkten. Zur Vermeidung von Leistungsverlusten bei aktuellen und zukünftigen Einspritzsystemen wurde im Rahmen eines Forschungsvorhaben der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen am LKV Rostock eine Labortestmethode für das präventive Kraftstoffscreening bezüglich der Belagsbildungsneigung entwickelt und mit Prüfstandstests verifiziert.

MOTIVATION

Aufgrund von Entwicklungsvorgaben für moderne Einspritzsysteme und einem steigenden Anteil verschiedener Beimischkomponenten in Dieselkraftstoffen sind Untersuchungen der Auswirkungen von Ablagerungen in Einspritzkomponenten auf das Betriebs- und Emissionsverhalten von Dieselmotoren von Interesse. Im Projekt JFTOT (Jet Fuel Thermal Oxidation Test)-Diesel I der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) wurde deshalb eine prüfstandsunabhängige Testmethode, der sogenannte Diesel-Deposit-Formation-Test (DDFT), für die Bewertung der Ablagerungsneigung von Dieselkraftstoffen auf Basis kommerziell erhältlicher Prüfgeräte erarbeitet und getestet [1, 2]. Weiterführende Untersuchungen erga-



AUTOREN



Dr. rer. nat. Ulrike Schümann ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock und Leiterin der Arbeitsgruppe Kraft- und Schmierstoffforschung.



Dipl.-Chem. Silvia Berndt ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock.



Sebastian Cepelak, M. Sc. ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter 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.

ben die Notwendigkeit, die Beläge nicht nur nach ihrer maximalen Schichtdicke, sondern differenziert nach dem Temperaturbereich ihrer Entstehung zu beurteilen. Für die Übertragbarkeit des Bewertungsergebnisses auf die Praxis ist es weiterhin erforderlich, zu berücksichtigen, welche Temperaturbedingungen in den jeweiligen realen Einspritzsystemen herrschen und wie robust die Injektoren sind. Im Folgeprojekt JFTOT-Diesel II wurde deshalb eine neue Bewertungsmethode für die Belagsbildungsneigung von Dieselmotoren in Einspritzkomponenten in Abhängigkeit von der Temperatur entwickelt. Dabei werden die im DDFT erzeugten Schichtdickenmessdaten (Thickness Maps beziehungsweise Plots) bestimmten Temperaturbereichen zugeordnet, gewichtet und mit Befunden aus Einspritzprüfstandtests korreliert (Belagsschichtdicken auf Bauteilen/Injektorfehlfunktionen).

INTERNE DIESELINJEKTORBELÄGE

Die Ursachen für Ablagerungen in Injektoren (Internal Diesel Injector Deposits, IDID) erstrecken sich sowohl auf den Einfluss des Grundkraftstoffs und die vielfältigen Wechselwirkungen von Additiven als auch auf den Entwicklungstrend bei Einspritzsystemen in Richtung immer geringerer Einbauspiele der Bauteile beziehungsweise höherer Einspritzdrücke. Dabei treten die Ablagerungen oft in Kombinationen auf, die regional-, kraftstoff- und additivbedingt voneinander abweichen. Als Belagsbildner wurden in der Literatur am häufigsten Carbonsäuren, Metallcarboxylate (Seifen), Amidpolymere und heterozyklische Stickstoffverbindungen (Präkursor für oxidative Beläge) nachgewiesen [3–8]. Als besonders injektorkritisch werden seifen- und amidartige Beläge angesehen, da sie bereits nach kurzer Zeit am Prüfstand zu

erheblichen Einschränkungen der Injektorfunktion führen [3, 4]. Normgerechter Biodiesel (FAME) beziehungsweise FAME-Blends zeigten sowohl im DDFT [2, 9] als auch am Einspritzsystemprüfstand im Open-Loop-Betrieb eine belagsmindernde Wirkung [3]. Dies wird auf die verbesserte Löslichkeit von Oligomeren aus der Kraftstoffalterung durch die polaren FAME-Komponenten zurückgeführt. Eine Korrelation zwischen dem Parameter Oxidationsstabilität nach DIN EN 15751 mit der Belagshöhe/Filterverblockung im DDFT besteht nicht [9].



BILD 1 Aluminium-Heizstab nach DDFT mit Belägen im Hochtemperaturbereich
(© LKV | Universität Rostock)

DDFT-METHODE

Die kraftstoffbasierten Ablagerungen werden im DDFT an Aluminiumheizstäben, **BILD 1**, mit einem modifizierten Jet-Fuel-Thermo-Oxidation-Testgerät (Diesel Thermo Oxidation Test, DTOT) und unter speziell angepassten Testbedingungen erzeugt [1, 2]. Die Heizstaboberfläche weist während des Tests einen definierten Temperaturgradienten auf [2]. Die Bewertung der Ablagerungsneigung basiert auf der Schichtdickenverteilung der Ablagerungen in bestimmten Temperaturbereichen auf den Heizstäben und der Erhöhung des Differenzdrucks am integrierten Prüffilter.

Die Belagsbildung ist ein dynamischer und temperaturabhängiger Prozess.

Metallcarboxylate (Seifen) als potenziell kritischster Ablagerungstyp entstehen bereits bei Raumtemperatur und fallen ab 140 °C als Ablagerungen auf Bauteilen aus [1, 2, 5]. Trotz der relativ weichen Konsistenz dieser Ablagerungen wurden in Einspritzprüfstandtests bei entsprechend dotierten Kraftstoffen nach kurzer Zeit Beeinträchtigungen im Betriebsverhalten der Injektoren beobachtet. Selbst Spurenkonzentrationen von Metallen (0,5 mg/kg Na) im Kraftstoff führen in Anwesenheit von Carbonsäuren bereits zur Seifenbildung. Amidartige Ablagerungen bilden sich hauptsächlich im Temperaturbereich zwischen 150 und 240 °C als sichtbare lackartige Beläge. Oft wird hier ein auffälliges Farbspektrum der Beläge (Pfaugentyp) beob-

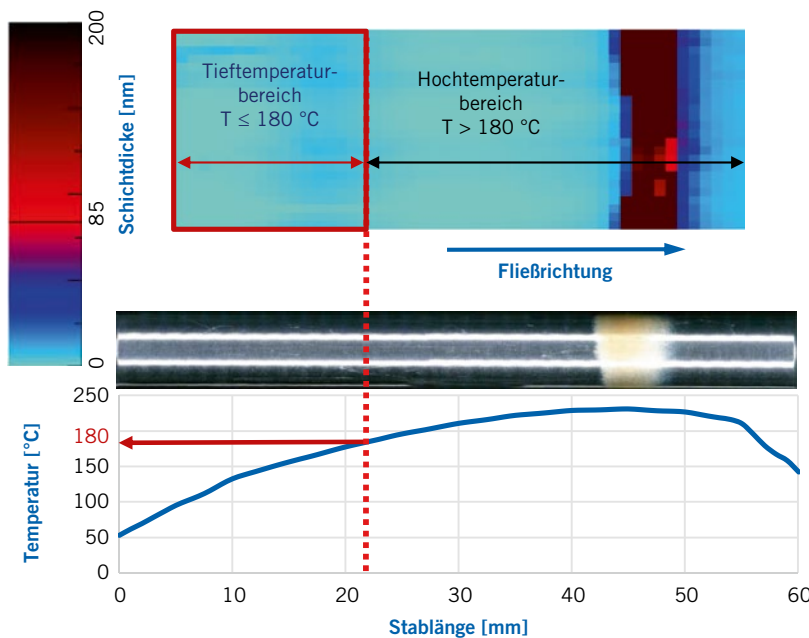
achtet. An diesen Bereich schließt sich die Zone oxidativer Beläge an. Bei (additivfreien) Kohlenwasserstoffen beginnt die Autooxidation und Belagsbildung auf den Heizstäben zwischen 260 und 280 °C [2, 5]. Bei vorgealterten Kraftstoffen werden diese goldglänzenden bis dunkelbraunen Beläge bereits unter 240 °C beobachtet [2, 3, 5]. Aus Prüfstandversuchen ist weiterhin bekannt, dass typische Kraftstofftemperaturen im Inneren von Common-Rail-Injektoren zwischen 150 und 180 °C liegen [2].

Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurde die Heizstaboberfläche in zwei Bereiche, den Tieftemperaturbereich (Low Temperature Area, LTA) und den Hochtemperaturbereich (High Temperature Area, HTA), eingeteilt, **BILD 2**. Die kalte Zone (LTA) auf dem Heizstab liegt im Bereich des Kraftstoffeintritts im Temperaturbereich von 95 bis 180 °C. Es handelt sich hierbei um die relevante Zone für IDID. Die heiße Zone (HTA) im Temperaturbereich > 180 bis 240 °C repräsentiert die Zone beginnender Kraftstoffoxidation beziehungsweise Additivzersetzung. Beläge in dieser Zone werden daher im DDFT anders gewichtet.

Die 2-D-Schichtdickendarstellung (Thickness Map) und die Schichtdickendaten einer Messung (24 x 50 Messpunkte, Thickness Plot) stammen aus dem Ellipsometer Report. Die Parameter LTA MDT und HTA MDT werden über eine Matlab-Routine aus dem Thickness Plot generiert. Bestandteil des Tests ist auch eine visuelle Bewertung der Beläge. Die Dokumentation erfolgt über eine Digitalmikroskop-Übersichtsaufnahme des Heizstabs, **BILD 2**.

VALIDIERUNG DER DDFT-METHODE DURCH PRÜFSTANDTESTS

Zur Validierung der Prüfmethode wurden sechs Einspritzsystemprüfstandtests im Open-Loop-Betrieb, **BILD 3**, mit dem CEC-Referenzdieselmotorkraftstoff RF 79-07 und durch Zugabe verschiedener Ablagerungsbildner und Additive durchgeführt, **TABELLE 1**. Die Korrelation der Ergebnisse erfolgte anhand eines Vergleichs der DDFT-Daten (Parameter LTA MDT, HTA MDT, Druckdifferenz Δp) mit der mittleren Belagsschichtdicke auf der Injektorzwischenplatte (Spacer) und dem Verlauf der Leckagetemperatur. Diese und weitere Ergebnisse der Prüf-



Tieftemperaturbereich: 95–180 °C Parameter LTA MDT
(maximale Schichtdicke der Ablagerung = Mittelwert der sechs höchsten Messpunkte)
Hochtemperaturbereich: > 180–240 °C Parameter HTA MDT
(maximale Schichtdicke der Ablagerung = Mittelwert der sechs höchsten Messpunkte)

BILD 2 Einteilung des Ellipsometer Thickness Maps in zwei Temperaturbereiche (Thickness Map – gemessene Schichtdickenverteilung am Heizstab (oben); Übersichtsaufnahme Heizstab nach Test (Bildmitte); Temperaturverlauf am Heizstab (unten)) (© LKV | Universität Rostock)

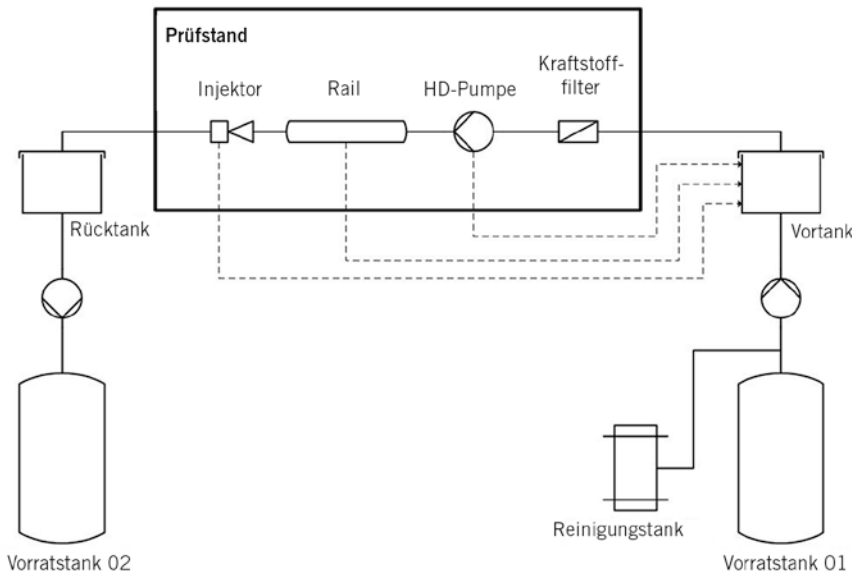


BILD 3 Schema des Einspritzsystemprüfstands (Open-Loop-Betrieb) (© LKV | Universität Rostock)

	Testnummer	Testkraftstoff	Zusätze/Additive
Referenz	2	CEC-Referenzkraftstoff RF 79-07	Keine
Prüfstandstests mit Amidpolymerbildnern (Amide Polymer Forming Substances, APFS)	1	RF 79-07 mit APFS	100 ppm DDSI
	3	RF 79-07 mit APFS und Additiv	100 ppm DDSI + 30 ppm DCA2
	4	RF 79-07 mit APFS und Additiv	100 ppm DDSI + 300 ppm 2-EHN
Prüfstandstests mit Seifenbildnern (Soap Forming Substances, SFS)	5	RF 79-07 mit SFS	0,5 ppm Na + 10 ppm DDSA
	6	RF 79-07 mit SFS und Additiv	0,5 ppm Na + 10 ppm DDSA + 30 ppm DCA2

TABELLE 1 Übersicht der Prüfstandsversuche (© LKV | Universität Rostock)

Resultate Prüfstand	CEC RF 79-07 (Referenz)	Referenz + 100 ppm DDSI + 30 ppm DCA2*	Referenz + 100 ppm DDSI + 300 ppm 2-EHN	Referenz + 0,5 ppm Na + 10 ppm DDSA**	Referenz + 0,5 ppm Na + 10 ppm DDSA + 30 ppm DCA2
DDFT-Resultate					
Belagschichtdicke auf der Injektorzwischenplatte > 2 µm	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
T _{Leckage} [°C]	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
Injektorverhalten	Kein Einfluss	Verschlechterung	Verschlechterung	Verschlechterung	Kein Einfluss
Beläge auf Heizstab in LTA > 15 nm	HTA	LTA / HTA	LTA / HTA	LTA	Keine
Anstieg des Differenzdrucks > 0,2 mmHg	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein

*Testabbruch nach 138 h infolge Raildruckabfall

**Testabbruch nach 92 h infolge Raildruckabfall

TABELLE 2 Korrelation der Ergebnisse der Prüfstandsversuche mit den DDFT-Resultaten (© LKV | Universität Rostock)

standstests zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den DDFT-Ergebnissen, BILD 4 und TABELLE 2.

BEWERTUNGSCHEMA UND KRAFTSTOFFKATEGORIEN

Aus einer repräsentativen Anzahl von untersuchten Kraftstoffen (468 Modellkraftstoffe mit Zusatz von Belagsbildnern und kommerziellen Kraftstoffen) und den Ergebnissen aus 18 Tests am Einspritzsystemprüfstand mit einem ausgewählten State-of-the-art-Injektor wurde eine Musterdatenbank aufgebaut und die Kraftstoffe nach ihrer Belagsbildungsneigung in drei unterschiedliche Kategorien eingeteilt:

- Kraftstoffkategorie 1: Der Kraftstoff zeigt keine Beläge. Kriterium DDFT: maximale Belagsschichtdicke in LTA und HTA ≤ 15 nm und Anstieg des Differenzdrucks im DDFT $\leq 0,2$ mmHg.
- Kraftstoffkategorie 2: Der Kraftstoff zeigt Belagsbildung im Hochtemperaturbereich. Kriterium DDFT: maximale Belagsschichtdicke in LTA ≤ 15 und HTA > 15 nm und/oder Anstieg des Differenzdrucks im DDFT $> 0,2$ mmHg. Anmerkung: Kraftstoffe mit Belägen im HTA waren bisher im Prüfstandstest nicht auffällig, es besteht jedoch keine langjährige Erfahrung im Feld, insbesondere bei höheren Injekortemperaturen.
- Kraftstoffkategorie 3: Der Kraftstoff zeigt Belagsbildung im LTA. Kriterium DDFT: maximale Belagsschichtdicke in LTA > 15 nm und/oder Anstieg des

	Neu	Prüfstandstest 2 CEC RF 79-07 (Referenz)	Prüfstandstest 1 Referenz + 100 ppm DDSI	Prüfstandstest 3* Referenz + 100 ppm DDSI + 30 ppm DCA2	Prüfstandstest 4 Referenz + 100 ppm DDSI + 300 ppm 2-EHN	Prüfstandstest 5** Referenz + 0,5 ppm Na + 10 ppm DDSA	Prüfstandstest 6 Referenz + 0,5 ppm Na + 10 ppm DDSA + 30 ppm DCA2
Bild Injektor Zwischenplatte							
Belagsschicht- dicke [µm]	-	1	38	27*	43	8**	1
T _{Leckage} [°C]	-	150	130-165	140-170	140-170	140-160	150
Bild Oberfläche Heizstab LTA							
Bild Oberfläche Heizstab HTA							
LTA MDT [nm]	-	2	5	265	140	17	6
HTA MDT [nm]	-	78	150	182	1079	7	5
Differenzdruck [mmHg]	-	0	250	43	250	0,5	0,2
Kategorie	-	2	3	3	3	3	1

* Testabbruch nach 138 h durch Raildruckabfall ** Testabbruch nach 92 h durch Raildruckabfall

BILD 4 Vergleich der Ergebnisse der Prüfstandsversuche mit den DDFT-Resultaten (© LKV | Universität Rostock)

Differenzdrucks im DDFT > 0,2 mmHg.
Anmerkung: Kategorie-3-Kraftstoffe verursachten Leistungsverluste im Prüfstandstest.

Die Definition der drei Kraftstoffkategorien bezieht sich jedoch speziell auf diese Testinstallation und zielt nicht auf die allgemeine Festlegung von Grenzwerten ab. Als potenziell kritisch erkannte Kraftstoffe erfordern weitere Prüfungen. Zur weiteren Validierung werden zusätzliche Prüfstandstests mit auffälligen Kraftstoffen (Kategorie 2 und Kategorie 3 nach DDFT) sowie eine repräsentative Anzahl von DDFT-Prüfungen mit auffälligen Kraftstoffen aus Motor-tests und aus dem Feld empfohlen, um die Übertragbarkeit der Kraftstoffkategorien auf Kraftstoffe ohne Ablagerungsbilder abzusichern.

ZUSAMMENFASSUNG

Im FVV-Forschungsvorhaben JFTOT-Diesel II wurde die Anwendbarkeit des Diesel-Deposit-Formation-Tests an Modellkraftstoffen mit Belagsbildnern und Additivzusätzen demonstriert. Die erzielten Ergebnisse korrelieren sehr gut mit Resultaten aus den parallel durchgeführten Prüfstandstests. Die DDFT-Methode ist sehr gut geeignet für ein präventives Screening von Kraftstoffen und Additiven. Sie leistet einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung aufwendiger Prüfstandstests.

LITERATURHINWEISE

[1] Berndt, S.; Schümann, U.; Sadlowski, T.; Buchholz, B.: Entwicklung eines Labortests für die Belagsbildungsneigung von Dieseldieselkraftstoffen. In: ATZoffhighway 11 (2018), Nr. 1, S. 57-61
 [2] Berndt, S.; et al.: Entwicklung einer Labormethode zur Bewertung von Dieseldieselkraftstoffadditiven bezüglich ihrer Tendenz zur Bildung interner Dieselinjektordeposits (IDID). Rostock, Universität, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, Abschlussbericht Projekt JFTOT Diesel (FVV-Nr. 1198), 2017
 [3] Berndt, S.; Schümann, U.; Cepelak, S.; Buchholz, B.: Application and validation of a laboratory test method for classifying diesel fuels according to their tendency to form deposits in injection components as a function of temperature. Rostock, Universität, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, Abschlussbericht Projekt JFTOT-Diesel II (FVV-Nr. 1285), 2020
 [4] Crusius, S.; et al.: Änderungen von Kraftstoffeigenschaften unter extremen Randbedingungen – Ablagerungen in Common Rail Injektoren II. Rostock, Universität, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, Abschlussbericht Projekt Kraftstoffveränderungen II (FVV-Nr. 1095), 2014
 [5] Lacy, P.: Use of a Laboratory Scale Test to Study Internal Diesel Injector Deposits. SAE 2016-01-2247, 2016
 [6] Leedham, A.; Caprotti, R.; Graupner, O.; Klaua, T.: Impact of Fuel Additives on Diesel Injector Deposits. SAE 2004-01-2935, 2004
 [7] Caprotti, R.; Breakspear, A.; Graupner O.; Klaua, T.: Detergency Requirements of Future Diesel Injection Systems. SAE 2005-01-3901, SAE International, 2005
 [8] Ullmann, J.: Effects of Fuel Impurities and Additive Interactions on the Formation of Internal Diesel Injector Deposits. Esslingen, 2009
 [9] Schümann, U.; Buchholz, B.: Belagsbildung und Belagsvermeidung Biodiesel (DIN EN 14214). Rostock, Universität, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, Forschungsbericht AGQM (Nr. 550_2018_1), 2019

DANKE



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für
Regionale Entwicklung

Das Forschungsvorhaben der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV) JFTOT-Diesel II (FVV-Nr. 1285) wurde am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren (LKV) der Universität Rostock unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz durchgeführt. Es wurde von der FVV mit Eigenmitteln finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr. Alexander von Stockhausen (Robert Bosch GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei der FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Das verwendete Laserscanning-Mikroskop wurde aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) innerhalb des operationellen Programms 2014-2020 zur Förderung von Forschungskompetenzen an Hochschulen und außeruniversitären Einrichtungen für wissenschaftliche Geräte gefördert.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.emag.springerprofessional.de/
atz-heavyduty-worldwide