

AUTOREN



**Dipl.-Chem.
Silvia Berndt**

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock.



**Dr. rer. nat.
Ulrike Schümann**

ist Leiterin der Arbeitsgruppe Kraft- und Schmierstoffforschung am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock.



**Dipl.-Ing.
Thomas Sadlowski**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock.

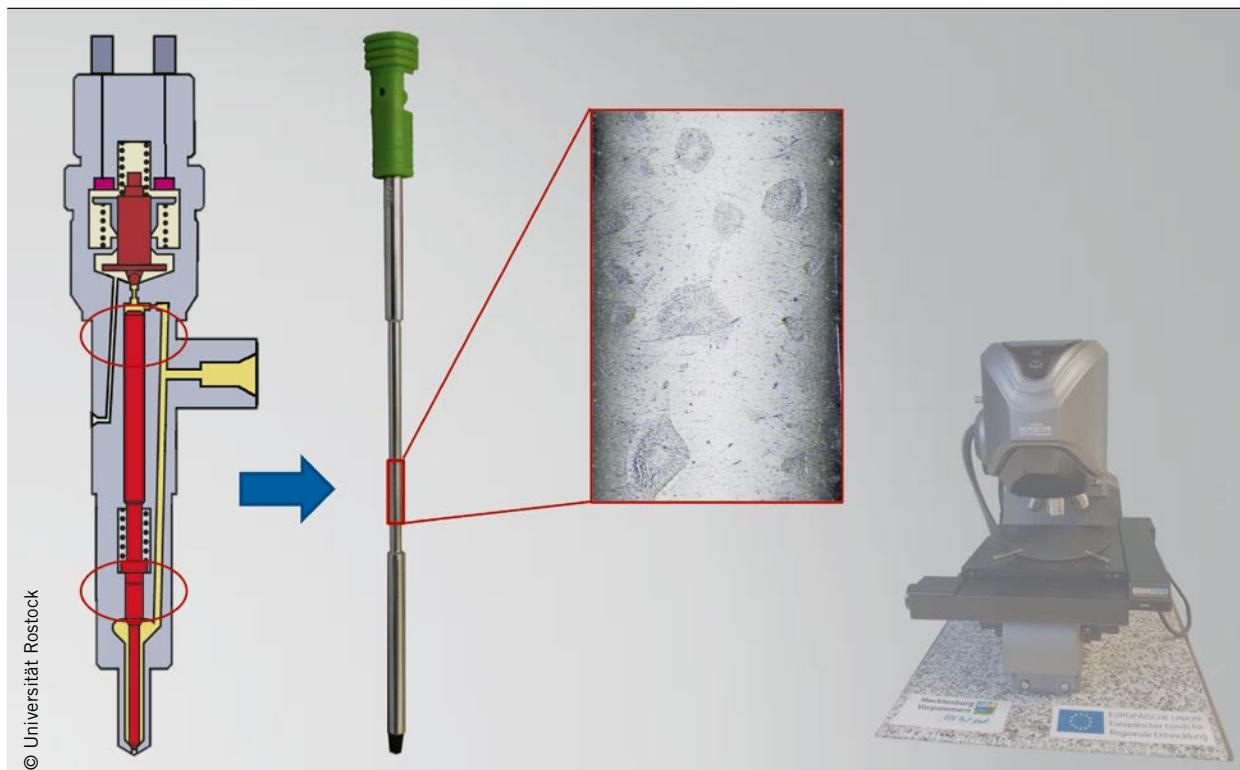


**Prof. Dr.-Ing.
Bert Buchholz**

ist Leiter des Lehrstuhls für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock.

Entwicklung eines Labortests für die Belagsbildungsneigung von Dieselkraftstoffen

In den letzten Jahren wurden Fehlfunktionen an Dieselmotoren festgestellt, die auf kraftstoffbedingte Ablagerungen in Common-Rail-Injektoren zurückzuführen sind. Die Ursachen für die Belagsbildung sind sehr komplex und schließen sowohl kraftstoffseitige als auch konstruktive Einflüsse mit ein. Eine Ursachenaufklärung kann mit aufwendigen motorischen Tests/Prüfstandtests oft nicht mehr geleistet werden. Deshalb besteht ein hoher Bedarf an einem einfachen und breit verfügbaren Labortest zum präventiven Kraftstoff-Screening. Am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock wurde in einem FVV-Forschungsvorhaben eine Testmethode zur Bewertung der Belagsbildungsneigung von Dieselkraftstoffen im Inneren von Common-Rail-Injektoren entwickelt.



© Universität Rostock

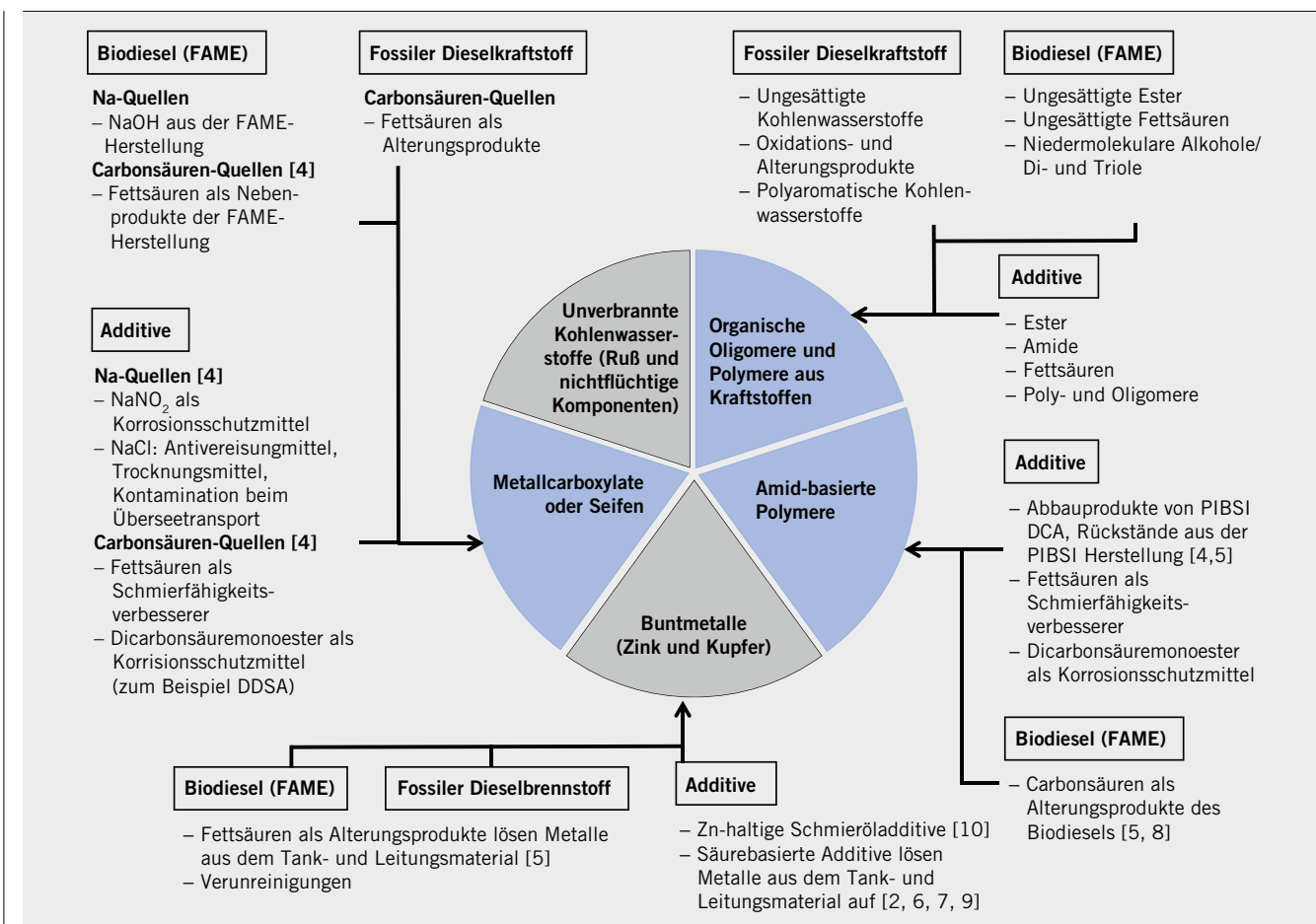


BILD 1 Ablagerungstypen und -quellen [1] (© Universität Rostock)

| | |
|---|-----------------------------------------------------------------------|
| 1 | MOTIVATION |
| 2 | STAND DES WISSENS |
| 3 | METHODENBESCHREIBUNG |
| 4 | BEWERTUNG DER MESSERGEBNISSE |
| 5 | ERMITTLUNG DES TEMPERATURGRADIENTEN AUF DEM HEIZSTAB |
| 6 | AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE UND IHRE VALIDIERUNG IM EINSPRITZPRÜFSTANDTEST |
| 7 | ZUSAMMENFASSUNG |

1 MOTIVATION

Die Einführung schärfer werdender Emissionsgesetze erfordert eine stetige Weiterentwicklung der dieselmotorischen Brennvorfahren. Der Entwicklungstrend geht zu zunehmend komplexeren Komponenten, deren sichere Funktionalität nur durch die Einhaltung äußerst enger Toleranzgrenzen – insbesondere im Bereich von Führungen bewegter Teile – gegeben ist. Bei einem typischen Düsenadelenspiel in Nkw-CR-Injektoren von circa 2 bis 4 µm können bereits Ablagerungen von wenigen Mikrometern erheblichen Einfluss auf das Betriebsverhalten von Injektoren haben. Denkbare Folgeerscheinungen wären erhöhte Emissionen und rauer Motorlauf aufgrund von Beeinträchtigungen im Timing des Injektors beziehungsweise veränderten Einspritzmengen sowie auch schwere Motorschäden durch dauerhaft falsch einspritzende Injek-

toren oder klemmende Nadeln/Ventile. Hierbei stehen Common-Rail-Injektoren für Heavy-Duty-Motoren wegen ihrer speziellen Anforderungen besonders im Fokus der Betrachtungen. Gerade diese Motoren sind gekennzeichnet durch Anwendungen mit höchsten Raildrücken, einem hohen Anteil an Hochlastbetrieb und den Einsatz in unterschiedlichsten Regionen und Märkten. Daneben sind hohe Zuverlässigkeit für eine lange Nutzungsdauer und Flexibilität in Bezug auf verschiedenste Kraftstoffe gefordert. Die im Projekt gewonnen Erkenntnisse können jedoch ebenfalls auf Pkw-Injektoren übertragen werden.

2 STAND DES WISSENS

In der Fachliteratur wird von einer Vielzahl unterschiedlicher Ablagerungsquellen und Reaktionspfade hinsichtlich der Bildung reaktiver und an der Ablagerungsbildung beteiligter Kraftstoffkomponenten berichtet [1–3]. Dabei treten sie oft in Kombinationen auf, die regional-, kraftstoff- und additivbedingt voneinander abweichen. BILD 1 zeigt eine Übersicht der beobachteten und untersuchten Ablagerungen sowie die Ursachen dieser Ablagerungen, wobei die Ablagerungstypen der farbig hinterlegten Segmente im Folgenden näher erläutert werden. Es ist ersichtlich, wie komplex die Ablagerungsentstehung sein kann und dass eine Vielzahl an ablagerungsbildenden Komponenten ursächlich dafür verantwortlich ist. Die Ursachen erstrecken sich sowohl auf den Einfluss des Grundkraftstoffs sowie vielfältige Wechselwirkungen von Additiven.



BILD 2 Demonstrationsgerät (© Universität Rostock)

Als besonders injektorkritisch werden seifen- und amidartige Beläge angesehen, da sie bereits nach kurzer Zeit am Prüfstand zu erheblichen Einschränkungen der Injektorfunktion führen. Daher muss die Weiterentwicklung der Dieseleinspritzsysteme mit einer Weiterentwicklung der Kraftstoffe einhergehen.

3 METHODENBESCHREIBUNG

Für die Entwicklung des Tests stand ein Demonstrationsgerät von PAC – Walter Herzog zur Verfügung, BILD 2. Das Gerät ist ursprünglich zur Bewertung der Belagsbildungsneigung unter hohen Temperaturen für Kerosin (Jet-Fuel-Thermal-Oxidation-Test nach ASTM D3241) entwickelt worden. Daher war eine hardwareseitige Anpassung des Geräts an die höheren Viskositäten von Dieselmotorkraft-

stoffen (bis 5 mm²/s) sowie bezüglich der verwendeten Dichtungsmaterialien (Biodieselverträglichkeit) erforderlich. Außerdem mussten grundlegend neue Bewertungsmethoden für die Beläge entwickelt werden, da gerade die besonders kritischen seifenartigen Beläge kaum mit bloßem Auge sichtbar sind.

Die Bewertung des Testergebnisses erfolgt im Diesel-Deposit-Formation-Test (DDFT) maßgeblich über Schichtdickenmessungen der Deposits auf der Prüffläche eines Al-Heizstabs, BILD 3, mittels Ellipsometer. Weiterhin wird die Verblockungsgeschwindigkeit eines Filters mit 17 µm Porenweite, der in der Versuchsanordnung, BILD 4, eingebaut ist, über den Druckabfall registriert. Die wesentlichen Arbeitsschritte zur Durchführung des DDFT-Tests sind im Folgenden kurz zusammengefasst: Der speziell gefertigte und kommerziell erhältliche Al-Heizstab wird in die Heizrohrummantelung eingebaut, Vorfilter und Testfilter werden montiert sowie das Thermoelement im Inneren des Heizstabs platziert. Potenzielle Ablagerungen werden auf einer zylindrischen Messfläche (3,175 mm Durchmesser x 60 mm Länge) zwischen den Schultern des Stabs ausgebildet. Der Kraftstoffeinlass zum Heizstab ist an der 0-mm-Position und der Kraftstoffaustritt bei 60 mm, BILD 4.

Die Kraftstoffprobe (600 ml) wird in einen Probenvorratsbehälter gefüllt und 6 min mit getrockneter Luft durchströmt. Das Kraftstoffsystem wird anschließend mit einem Druck von 34 bar beaufschlagt und der Heizstab auf die im Programm gewählte Set-Point-Temperatur von 240 °C temperiert. Der Heizstab wird resistiv beheizt. Die Temperaturregelung erfolgt über ein Thermoelement, das im Inneren des Heizstabs positioniert ist (Regeltemperatur T_{max} bei 39 mm). Eine isokratisch arbeitende Pumpe fördert den Kraftstoff mit einer definierten Flussrate (3 ml/min) durch die Messanordnung, BILD 5. Der Kraftstoff umspült den Heizstab und wird durch den Präzisionsfilter bis in den Abfallbehälter geleitet. Die Testdauer beträgt 150 min.

Oxidative Beläge werden in der Regel am heißesten Bereich des Prüfstabs, der zwischen der 30- und 50-mm-Position liegt, beobachtet. Seifenartige Ablagerungen sind hauptsächlich im Niedrig-

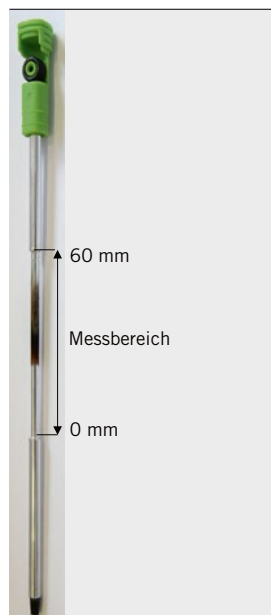


BILD 3 Aluminiumheizstab (© Universität Rostock)

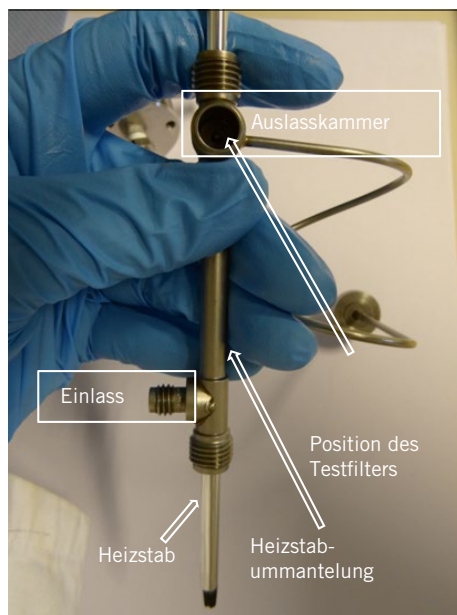


BILD 4 Einbau der Heizstäbe (© Universität Rostock)



BILD 5 Messanordnung (© Universität Rostock)

BILD 6 Temperaturverlauf auf der Heizstaboberfläche (T_{max} 240 °C)
(© Universität Rostock)

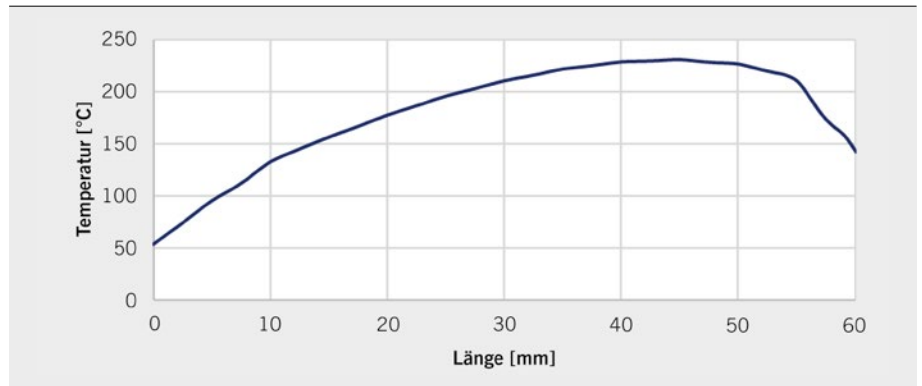


BILD 7 Übersicht der Testkraftstoffe und gemessene Differenzdrücke aus dem DDFT
(© Universität Rostock)

Referenz-Dieselmotortest für den DW10C-Test:

- RF 79-07 (Referenzkraftstoff – ohne Effekt im Motortest)
- RF 79-07 + 0,5 ppm Na + 10 ppm Dodecylbernsteinsäure (DDSA) (Referenzkraftstoff mit Seifenbildnern)

| Test-nummer | Na [mg/kg] | Dodecylbernsteinsäure [mg/kg] | Δp [mmHg] | Zeit bis 25 mmHg [min] |
|-------------|------------|-------------------------------|-------------------|------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,5 | 10 | 0 | 0 |
| 4 | 0,5 | 10 | 0 | 0 |
| 5 | 3 | 20 | 250,1 | 52,8 |
| 6 | 3 | 20 | 246,6 | 49,8 |

Keine Einschränkungen im DW10C-Test (Tests 1-2)
Kaltstartprobleme DW10C-Test (Tests 3-4)
Verschärfte Bedingungen (Tests 5-6)

temperaturbereich (bis 180 °C) lokalisiert. Ablagerungen (Kraftstoffabbauprodukte), die vom Kraftstoffstrom abgespült und mitgerissen werden, führen zum Verblocken des Testfilters. Nach Testende wird die Messanordnung zerlegt, Leitungen und Prüfstab mit Heptan gespült, getrocknet und dieser optisch ausgewertet.

4 BEWERTUNG DER MESSERGEBNISSE

Für die Auswertung der Messergebnisse wurden folgende Methoden angewendet:

- Ellipsometrie (Schichtdickenmessungen)
- Digital- und Laserscanning Mikroskopie (Übersichts- und Detailaufnahmen der Beläge)
- FTIR-Mikroskopie (Identifikation der Beläge).

Die Kombination der Daten von Druckanstieg aus dem DDFT-Test, Auswertung der Schichtdickenmessdaten (Standard-Spot-Thickness sowie der Thickness-Maps) mittels Ellipsometer im Vergleich zu den aufgenommenen Digitalmikroskopaufnahmen der Heizstäbe mit 100-facher Vergrößerung, lässt eine verlässliche Beurteilung der generierten Beläge zu. In ausgewählten Fällen wurden FTIR-mikroskopische Messungen zur Bestätigung des angenommenen Belagtyps durchgeführt.

5 ERMITTLUNG DES TEMPERATURGRADIENTEN AUF DEM HEIZSTAB

Ein weiteres wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Belagsbildung ist die Temperatur. Da aus der Literatur bekannt ist, dass bestimmte

Belagstypen in bestimmten Temperaturfenstern auftreten, war die Bestimmung des Temperaturverlaufs auf der Oberfläche des Heizstabs von großer Bedeutung für die Interpretation der Ergebnisse. Die Bestimmung der Temperaturgradienten basiert, bedingt durch die schlechte Zugänglichkeit der Heizstäbe im DDFT für Thermoelemente, auf Simulationen.

Aus Prüfstandsversuchen ist bekannt, dass typische Kraftstofftemperaturen im Inneren von Common-Rail-Injektoren maximal zwischen 150 und 180 °C liegen. Die Set-Point-Temperatur von 240 °C wurde daher so gewählt, dass zum einen dieses Temperaturfenster auf dem Heizstab abgedeckt wird und zum anderen keine zu starke thermisch-oxidative Zersetzung des Kraftstoffs erfolgt. Die Randbedingungen der Simulation unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Stoffeigenschaften wurden daher auf diese Temperatur angepasst. Anhand der Simulation ergibt sich folgender Temperaturverlauf auf der Heizstaboberfläche, welche die Basis für die weiteren Untersuchungen bildet, **BILD 6**.

6 AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE UND IHRE VALIDIERUNG IM EINSPRITZPRÜFSTANDSTEST

Um die Ablagerungsbildungsneigung unterschiedlicher Dieselmotortestkraftstoffe im DDFT-Test und Prüfstandsversuch bewerten sowie vergleichen zu können, wurde unter anderem ein Prüfkraftstoff mit genormter Zusammensetzung getestet. Dieser Prüfkraftstoff (CEC RF 79-07) wird im IDID-DW10C-Motortest (CEC F-110-16) als Kraftstoff eingesetzt. Dieser Kraftstoff zeigt im Prüfstandsversuch keine Auffälligkeiten, das heißt, er führt im Motorversuch zu keiner-

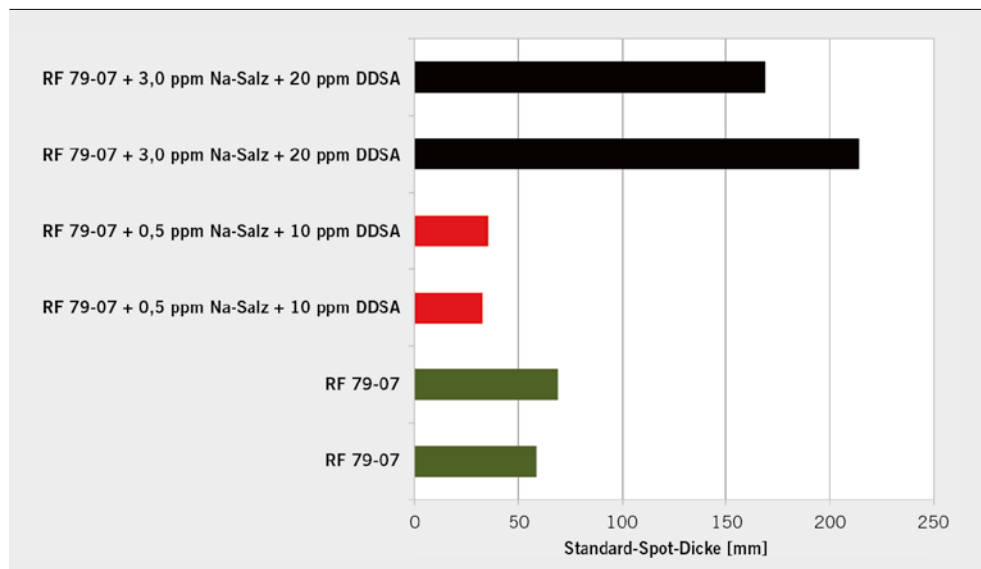


BILD 8 Standard-Spot-Dicke der Ablagerungen ohne und mit Zugabe von Seifenbildnern zur Referenz DK 79-07 (© Universität Rostock)

lei Einschränkungen im Injektorbetrieb. Um eine gezielte Bildung seifenartiger Beläge im DW10C-Motortest zu erzeugen, werden dem Prüfkraftstoff die Seifenbildner DDSA (Dodecylbernsteinsäure) und eine organische Na-Komponente beigemischt. Im Hinblick auf den gemessenen Differenzdruck im DDFT blieben beide Referenzkraftstoffe aus den DW10C-Motortest zunächst unauffällig. Erst eine erhöhte Konzentration an Seifenbildnern führte zu einem auffälligen Druckanstieg, der nach circa 50 min zur Bypass-Schaltung führte (Filterverblockung durch Seifenauskristallisation), **BILD 7**.

Betrachtet man die Ergebnisse der Schichtdickenmessungen, zeigt sich zunächst ein überraschendes Ergebnis. Die Standard-Spot-Thickness (mittlere Schichtdicke der höchsten Ablagerungen auf einer 2,5-mm²-Fläche wie in ASTM definiert) zeigt für den No-Effect-Referenzkraftstoff höhere Belagsschichtdicken an, als für den im Motortest kritischen Kraftstoff mit Zusatz von Seifenbildnern, **BILD 8**. Betrachtet man jedoch die dazugehörigen Ellipsometer-Thickness-Maps, wird erkennbar, dass sich Ablagerungen in unterschiedlichen Bereichen des Heizstabs ausbilden. Die Beläge des No-Effect-Referenzkraftstoffs bilden sich am heißen Teil des Heizstabs aus und resultieren aus der Kraftstoffoxidation bei hohen Temperaturen. Mit seifenbildenden Zusätzen werden Beläge im

Niedrigtemperaturbereich auf der Heizstaboberfläche generiert, gleichzeitig wird die Belagsbildung im Hochtemperaturbereich durch den Reinigungseffekt dieser Zusätze verhindert, **BILD 9**. Führt man nunmehr eine temperaturabhängige Bewertung der Beläge durch, das heißt, betrachtet injektorrelevante Temperaturbereiche, kommt man zu dem Schluss, dass die hohen Temperaturen, bei denen die Kraftstoffoxidation einsetzt, im realen Injektor nicht erreicht werden und diese somit nicht injektorrelevant sind.

Bei einer Höherdosierung der Zusätze wurden einzelne Konglomerate mit hoher Schichtdicke detektiert, aber keine geschlossene Schicht mehr festgestellt. Es kann vermutet werden, dass es hier zu einer Ablösung durch vorbeifließenden Kraftstoff kommt. Untersuchungen am Einspritzsystemprüfstand belegen eindrucksvoll die Richtigkeit dieser Annahme, **BILD 10**. Der No-Effect-Referenzkraftstoff ist im Prüfstandstest absolut unauffällig. Bei Zusatz von Seifenbildnern zum Referenzkraftstoff werden auffällige Beläge auf den Bauteilen und mit sehr hohen Schichtdicken im µm-Bereich beobachtet. Gleichzeitig treten starke Schwankungen der Leckagetemperatur (Indikator für Belagsbildung/Belagsablösung) und Schwankungen der Einspritzmenge (Einspritzverlaufsindikation) auf, was auf eine Störung des Injektorbetriebs schließen lässt.

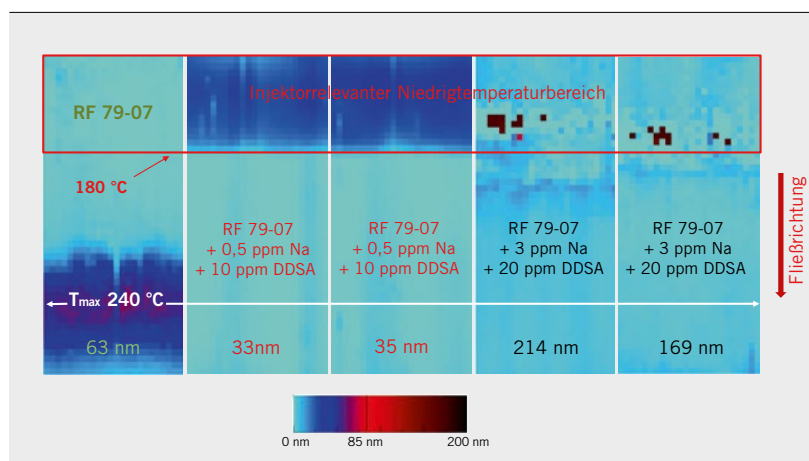


BILD 9 Thickness-Maps der Stäbe mit seifenartigen Ablagerungen (© Universität Rostock)

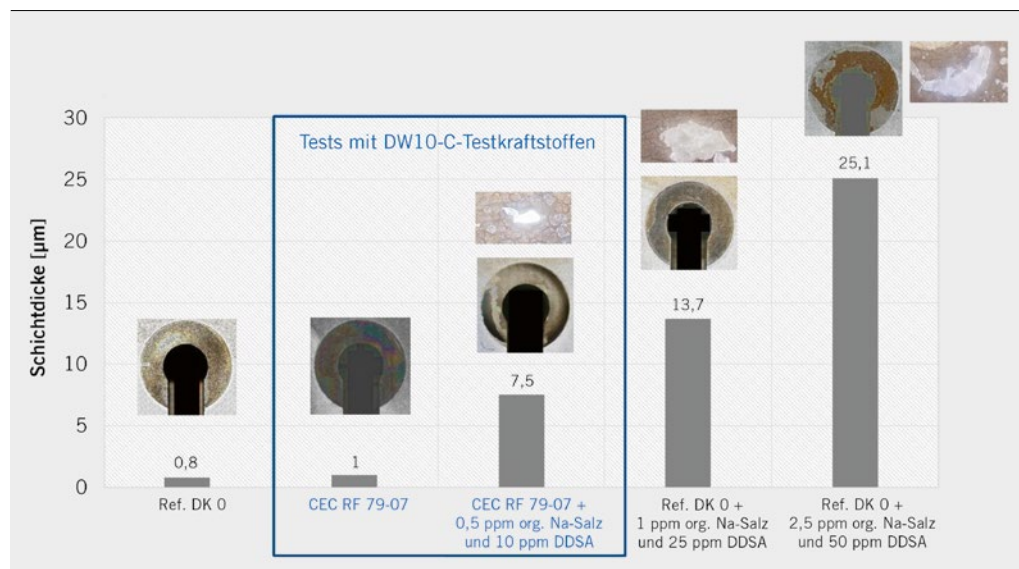


BILD 10 Schichtdicken auf Injektorbauteilen (Zwischenplatten) nach Tests mit DW10C Referenzkraftstoffen am Einspritzsystemprüfstand [11] (© Universität Rostock)

Sowohl auf dem Heizstab als auch auf der Injektorzwischenplatte wurden Seifen anhand ihrer typischen Banden mittels FTIR-Mikroskopie nachgewiesen. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Verwendung eines anderen fossilen Referenzkraftstoffs (Referenz DK 0). Es konnte damit gezeigt werden, dass der entwickelte Test sehr empfindlich auf Seifenbildner in Kraftstoffen anspricht (0,5 ppm Na) und die Ergebnisse sehr gut mit den Resultaten aus Einspritzprüfstandstests korrelieren. Die neue, temperaturabhängige Bewertung der Belagsschichtdicken im DDFT soll zukünftig eine Klassifizierung beziehungsweise sinnvolle Kraftstoffauswahl hinsichtlich der Robustheit und Einsatzbereiche der Injektoren durch den Entwickler ermöglichen.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Auf der Basis kommerziell erhältlicher Prüfgeräte (Jet-Fuel-Thermo-Oxidation-Tester und Ellipsometer) wurde eine prüfstandsunabhängige Testmethode für die Bewertung der Ablagerungsneigung von Dieselmotoren (Internal Diesel Injector Deposits) insbesondere im Hinblick auf das präventive Screening von Dieselmotoren erarbeitet und getestet. Hierzu wurde ein JFTOT-Gerät hardwareseitig an die Untersuchung von Dieselmotoren angepasst und die Methode so modifiziert, dass die Testbedingungen relevante Temperaturbereiche und Kraftstoffflussraten aktueller Injektorsysteme abbilden. Die erzielten Ergebnisse korrelieren sehr gut mit Resultaten aus Einspritzprüfstandstests. Der DDFT spricht empfindlich auf verschiedene Belagstypen im Kraftstoff an und hat das Potenzial, zukünftig aufwendige Prüfstandstests zu ersetzen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Crusius, S.; Junk, R.; Lau, K.; Richter, B.; Schümann, U.; Fink, C.; Harndorf, H.: Abschlussbericht Kraftstoffveränderungen II: Änderungen von Kraftstoffeigenschaften unter extremen Randbedingungen – Ablagerungen in Common Rail Injektoren II. Universität Rostock, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, Rostock, 2014
- [2] Leedham, A.; Caprotti, R.; Graupner, O.; Klaua, T.: Impact of Fuel Additives on Diesel Injector Deposits. SAE 2004-01-2935, 2004
- [3] Caprotti, R.; Bhatti, N.; Balfour, G.: Deposit Control in Modern Diesel Fuel Injection Systems. SAE 2010-01-2250, SAE International, 2010
- [4] Lacey, P.; Gail, S.; Kientz, J. M.; Benoist, G.; Downes, P.; Daveau, C.: Fuel Quality and Diesel Injector Deposits. SAE Int. J. Fuels Lubr.; SAE2012-01-1693

- [5] Ullmann, J.; Geduldig, M.; Stutzenberger, H.; Caprotti, R.; Balfour, G.; Hess, D.: Effects of Fuel Impurities and Additive Interactions on the Formation of Internal Diesel Injector Deposits. Online: www.google.com/search?q=Effects+of+Fuel+Impurities+and+Additive+Interactions+on+the+Formation+of+Internal+Diesel+Injector+Deposits&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b&gfe_rd=cr&dcr=0&ei=r65tWu-9CYTA8gev746gDg, aufgerufen am 28.01.2018
- [6] Caprotti, R.; Breakspear, A.; Graupner, O.; Klaua, T.: Detergency Requirements of Future Diesel Injection Systems. SAE 2005-01-3901, SAE International, 2005
- [7] Caprotti, R.; Breakspear, A.; Graupner, O.; Klaua, T.; Kohnen, O.: Diesel Injector Deposits Potential in Future Fueling Systems. SAE 2006-01-3359, 2006
- [8] McCormick, R. L.; Westbrook, S. R.: Storage Stability of Biodiesel and Biodiesel Blends. In: Energy & Fuels (2010), Nr. 24, S. 690–698
- [9] Barker, J.; Snape, C.; Scurr, D.: A Novel Technique for Investigating the Characteristics and History of Deposits formed within High Pressure Fuel Injection Equipment. SAE 2012-01-1685, SAE International, 2012
- [10] Tang, J.; Pischinger, S.; Grütering, U.; Keck, J.: Einflüsse auf die Belagsbildung bei Einspritzdüsen von Dieselmotoren mit Direkteinspritzung. In: MTZ 69 (2008), Nr. 9, S. 754–761
- [11] Nowotny, M.; Junk, R.; Schümann, U.; Fink, C.; Buchholz, B.: Abschlussbericht Kraftstoffveränderungen III: Ablagerungen in Common Rail Injektoren – kraftstoffseitige und konstruktive Maßnahmen. Universität Rostock, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, Rostock, 2017

DANKE

Das FVV-Forschungsvorhaben Entwicklung eines Labortests für die Belagsbildungsneigung von Dieselmotoren wurde am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf und 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 Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Wir bedanken uns insbesondere bei Dipl.-Ing. René Junk für die Durchführung der Versuche am Einspritzsystemprüfstand. Das verwendete Laserscanning Mikroskop wurde aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) innerhalb des operativen 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-offhighway-worldwide