

PRÄZISER UND SCHWEISSFREIER HOCHDRUCKSENSOR FÜR GROSSMOTOREN

Die Anforderungen an die Robustheit und die Präzision von Hochdrucksensoren für Einspritzsysteme steigen im Bereich der Großdieselmotoren auf Grund der höheren Systemdrücke zunehmend an. Auch kostenmäßig muss das Design dem Sensoreinsatz in der Großserie gerecht werden. Diese Anforderungen werden vom neu entwickelten Trafag Hochdrucksensor erfüllt.

AUTOREN



DIPL.-ING. (FH) ULRICH STAIGER
ist Projektleiter Motorendruck-
sensoren bei der Trafag AG
in Männedorf, Schweiz.



DR. DIETER ZEISEL
ist Leiter Forschung und Entwicklung
bei der Trafag AG
in Männedorf, Schweiz.

MOTIVATION

Ein ausgefeiltes Sensordesign ist erforderlich, weil im Hydraulikbereich die Medientemperatur des Schweröls (HFO Heavy Fuel Oil) bis zu 150 °C ansteigen und der relative Druckhub der Einspritzdrücke über 1500 bar liegen kann. Zugleich muss die Wechsellastfestigkeit von Common-Rail-Systemen (10^{10} Zyklen) bei Systemdrücken von bis zu 3000 bar und das hohe Vibrationsniveau berücksichtigt werden.

Die Entwicklung und Optimierung motorischer Brennverfahren, wie die Modulation der Einspritzung bei Common-Rail-Systemen, benötigt immer präzisere, robustere und gleichzeitig kostengünstigere sensorische Elemente. Seit über zehn Jahren fertigt die Schweizer Trafag AG Common-Rail-Drucksensoren für die Erfassung von Spitzendrücken bis hin zu 3000 bar. Die Sensoren werden außerdem für die Spitzendrucküberwachung in diversen Pumpe-Leitung-Düse-Systemen eingesetzt. Hier treten bei Großdieselmotoren bis zu 10^{10} Lastwechsel von 0 auf etwa 2000 bar auf und erfordern ein extrem robustes und langzeitstabiles Design.

Im Wesentlichen werden drei Hauptanforderungen an einen Hochdrucksensor gestellt: Erstens sollte er kostengünstig sein. Zweitens sollte er gerade in der Motorenumgebung äußerst stabil und robust sein. Schließlich muss er drittens über eine ausreichend schnelle Messdatenverarbeitung und ein hohes Genauigkeitsband über Temperatur verfügen.

DÜNNFILMTECHNOLOGIE ERMÖGLICHT HOHE LANGZEITSTABILITÄT

Von der Vielzahl der am Markt verbreiteten Sensortechnologien wird im Hochdruckbereich (> 2000 bar) auf resistive Messverfahren zurückgegriffen. Neben der in der MTZ bereits vor einigen Jahren vorgestellten MSG (Metal Strain Gages) Technologie [1] bietet sich hier die Dünnschichttechnologie an. In diesem Prozess werden im Wesentlichen zwei Schichtsysteme verwendet: Zuerst werden die für die elektrische Isolation vom Grundkörper notwendige Glaschicht aus SiO_2 mittels eines CVD-Verfahrens (Chemical Vapor Deposition, deutsch: Chemische Gasphasenabscheidung) aufgebracht, welcher eine Grundisoliationsfestigkeit von über 500 VAC liefert. Anschließend werden die für die Wheatstone'sche Messbrücke notwendigen Nickel- und NiCr-Legierungen direkt auf die SiO_2 Oberfläche aufgesputtert. Im darauffolgenden Prozessschritt werden mit lithographischen Bearbeitungsschritten die eigentlichen mäanderförmigen NiCr-Dehnungsmessstreifen freigelegt.

Im Gegensatz zu den weit verbreiteten Silizium-basierten Drucksensor-Systemen [2] erreicht man in der Dünnschichttechnologie weit aus geringere Temperaturfehler und eine höhere Langzeitstabilität, da alle verwendeten Materialien ähnliche thermische Ausdehnungskoeffizienten besitzen.

Die Veränderung der Nullpunktlage der Wheatstone'schen Messbrücke kann als eine Kenngröße der Sensorstabilität verwendet werden. Um diese Langzeitstabilität auch in der direkten Motorenumgebung über Lebensdauer näher zu untersuchen, wurden verschiedene Sensoren über sieben Jahre bei 120 °C ausgelagert und die Veränderung des Sensor-Nullpunktes untersucht. ①, zeigt die dabei erzielten Driftwerte, die alle weit unter 0.5 % FS (FS = full scale, der skalierte Messbereich) liegen. Die ebenfalls untersuchten Drucksensoren einer anderen resistiven Technologie (Dickfilm-

auf-Keramik, Hybridtechnologie) besitzen fast zehnfach höhere Driftwerte. Die in Dünnschichttechnologie verwendeten NiCr-Legierungen bieten zudem den Vorteil einer sehr hohen Fertigungs- und Temperaturstabilität bis hin zu 200 °C.

SCHWEISSFREIES DESIGN BIETET HOHE SICHERHEIT

Die neueste Generation der Hochdruck-Sensoren nutzt ein schweißfreies Design, das auf einem einfachen monolithischen Körper aus ausscheidungsgehärtetem 17-4PH CrNi Stahl basiert. Eine hochgenaue Tieflochbohrung im Zentrum des Sensorkörpers endet an der Membran, welche eine exakt definierte Dicke aufweisen muss. Diese Membran kann auf sehr hohe Drücke (> 3000 bar) ausgelegt werden. Der Dünnschicht wird nicht direkt auf diese Membran aufgebracht, sondern die Verformung wird an der dünnsten Membranstelle über einen winzigen Dehnungskörper (Biegebalken) detektiert. Bei derart hoch schwellbelasteten Sensoren, gilt es vor allem, das Spannungsniveau im Vergleich zur Streckgrenze tief zu halten, um die Dauerfestigkeit zu gewährleisten. Das Material 17-4PH (1.4542) lässt zwar eine maximale Zugfestigkeit von über 1300 MPa zu. Neuere Studien zeigen jedoch, dass die Wechsellastfestigkeit im Giga-Zyklen-Bereich unter Umständen reduziert sein kann [3]. Im Gegensatz zu geschweißten Konstruktionen bietet die monolithische Ausführung des Sensorkörpers hohe Sicherheit gegen schwellende Belastung durch ein kerbfreies Design und ein tieferes Eigenspannungsniveau, da wegen des Fehlens einer Schweißzone keinerlei Festigkeitsreduktion vorliegt.

FEM-BERECHNUNG MIT BERÜCKSICHTIGUNG DES EINBAUZUSTANDS

Bei der FEM-Festigkeitsauslegung des Sensorkörpers werden zwei Lastfälle unterschieden. Der erste Lastfall bestimmt die Verformung und Spannungen nach der Montage und Anwendung eines bestimmten Anzugsmoments. Durch einen Differenzwinkel von 0.5° bis 1° zwischen Sensorkörper und Einbausitz wird zuerst eine linienförmige Auflage erreicht, welche in der Regel auf der druckzugewandten Seite dichtet. Die durch das Drehmoment erzeugten Sitzkräfte liegen im Bereich > 10 kN und de-

formieren die Sitzpartner solange, bis in der Kegelmantelfläche die Spannung unter die Streckgrenze reduziert worden ist, ②. Dann haben sich die Sitzpartner einander angepasst und ermöglichen fortwährende Dichtheit. Wichtig für eine genaue Vorspannkraft ist hierbei die definierte Schmirung des Gewindes.

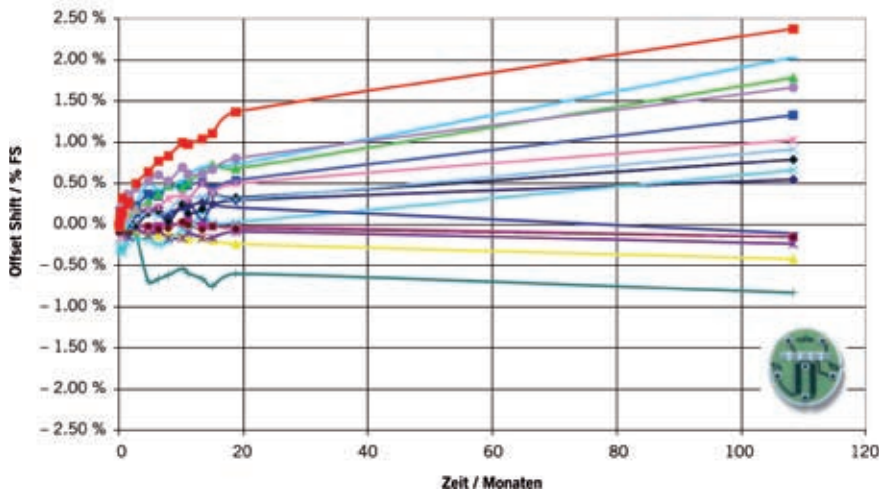
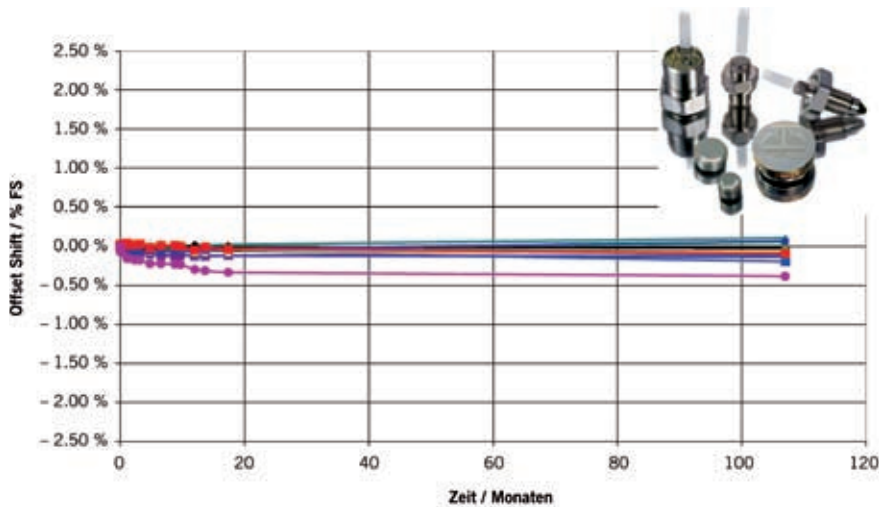
Der zweite Lastfall hat als Basis den Montagezustand, dem nun der Druck überlagert wird, um die Deformationen und Spannungen an Körper und Membran zu ermitteln. Die Auslenkung des Biegebalkens beträgt nur wenige Mikrometer im Fall des Nominaldrucks in Höhe von 2500 bar ③.

Die elektrische Anbindung des Biegebalkens auf eine Leiterplatte erfolgt mittels Drahtbonden, um die Elektronik mechanisch vom Sensorelement zu entkoppeln. In der neuesten Generation von

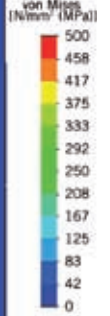
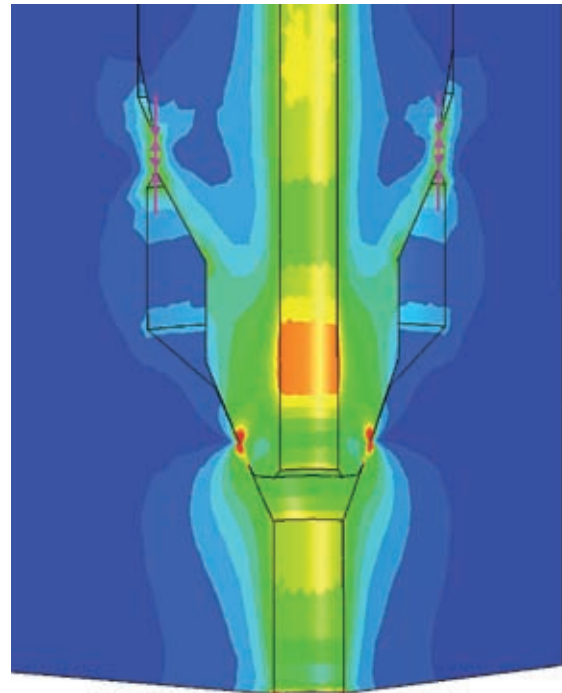
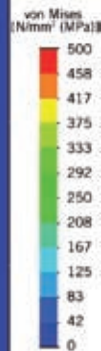
Sensoren kann mit einer einzigen elektronischen Leiterplatte (pcb = printed circuit board) gearbeitet werden. Die Leiterplatten sind wegen den hohen Anforderungen hinsichtlich elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) und Vibrationen fest mit dem metallischen Gehäuse verbunden. Die kundenspezifische Schnittstelle besteht in der Regel aus einem zu integrierenden Stecker oder einer entsprechenden Kabelbaugruppe.

SIGNALVERARBEITUNG MIT HIGH PERFORMANCE ASIC

Die Nutzsignale der Wheatston'schen Brückenschaltung, die auf Grund der geringen Auslenkung der Membrane entstehen, besitzen wie gezeigt, ①, eine außerordentlich hohe Stabilität. Nachteilig hingegen wirkt sich die geringe Signalhöhe aus. So ist bei einem k-Faktor von zwei



① Vergleich der Langzeitstabilität zweier resistiver Sensortechnologien (oben) NiCr Dehnungsmesstreifen aufgesputtert auf Stahl, (unten) Dickfilmtechnologie aufgedruckt und eingebrannt in ein Keramiksubstrat (Al₂O₃)

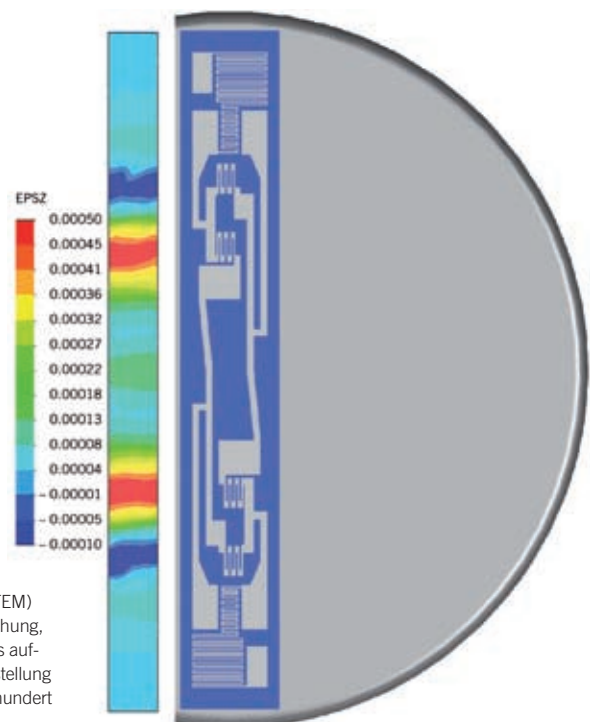


② Vergleichsspannung im Sitz während des Anziehens (links) und im vorgespannten Zustand mit Druckbelastung (rechts)

für NiCr-Dehnungsmessstreifen nur mit Signalen in der Höhe von 2 mV/V zu rechnen. Mit Hilfe modernster ASIC-Technologie (Application-Specific Integrated Circuit) kann dieser Nachteil aber umgangen werden. Der im Sensor verwendete Chip zeichnet sich durch eine offset-freie Verstärkerschaltung aus, die fortwährend in einem geschlossenen Regelkreislauf arbeitet und dabei im Regelpunkt Null eventuelle Verstärkerdrifts kompensiert. Auf diese Art und Weise können selbst kleine Signale im Bereich von < 2 mV Ausgangssignal bei 5 V Speisespannung noch hochwertig verstärkt und kompensiert werden. Für den Kunden können entsprechende Zoom-Messbereiche gewählt werden, die sich durch eine erhöhte Überdrucksicherheit auszeichnen (beispielsweise ein Faktor vier bis sechs des Messbereichs). Dabei werden Rauschwerte von $\sim 40 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ entsprechend $0.6 \mu\text{V}_{\text{eff}}$ (300 Hz) erreicht. ④, zeigt das Blockdiagramm der ASIC-Schaltung. Die analog-digital Wandlung erfolgt über Sigma-Delta-Wandler während die Fehlerkompensation in einem drei-dimensionalen Druck-Temperatur-Kompensationsfeld ermittelt wird. Dabei wird der jeweilige Fehler ermittelt und mittels eines schnellen Pulsbreitensignals zurückgekop-

pelt. Die Temperatur wird dabei entweder über die Chiptemperatur oder alternativ direkt mit einem Nickelwiderstand auf dem metallischen Sensorelement gemessen. So

kann die tatsächliche Medientemperatur sehr gut detektiert werden. Die Geschwindigkeit der Messdatenerfassung geschieht mit bis zu 10 kHz, so dass auch sehr schnell-



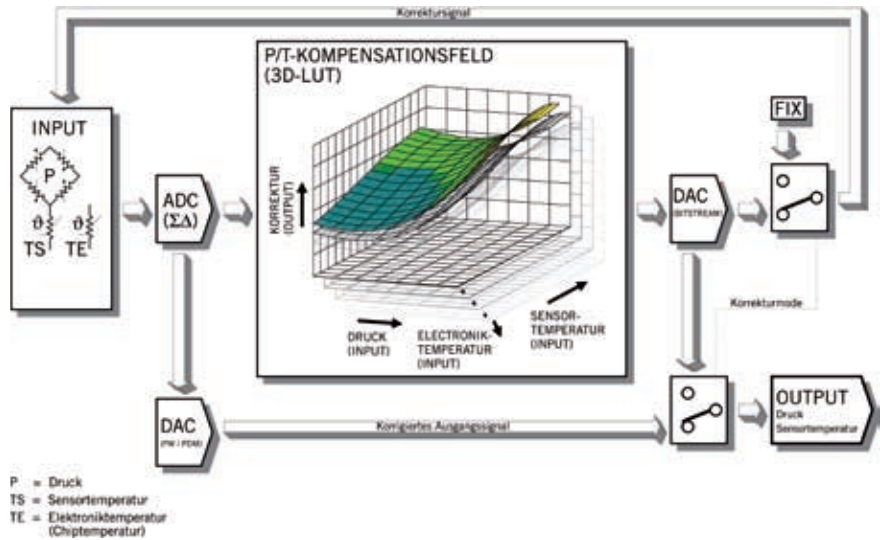
③ Die Finite Elemente Simulation (FEM) zeigt die Dehnungszonen (blau Stauchung, rot Zug) im Bereich des aufgeschweißten Biegebalkens. Die Darstellung der Auslenkung ist um einen Faktor hundert vergrößert

le, transiente Effekte im Bereich der Einspritzung erfasst werden können. Die Elektronik genügt allen EMV-Anforderungen nach IEC 61000 (level four) und den gängigen Schifffahrts- und Bahnnormen. Der für einen Drucksensor ausgewiesene Gesamtfehler setzt sich nach DIN 16086 aus dem NLH-Fehler (Nichtlinearitäts- und Hysteresefehler), dem Temperaturfehler und der Sensordrift zusammen. Der Gesamtfehler der Hochdrucksensoren im Temperaturbereich zwischen -20 bis 135 °C kann sehr klein gehalten werden, so dass Drucksensoren mit einem Gesamtfehler von 0.3 bis 0.5 % FS, also 10 bar bei einem 2500 bar Messbereich, realisiert werden können.

SENSOR-QUALIFIZIERUNG DURCH AUSGEDEHNTTE TESTS

Um die Robustheit des Designs zu überprüfen, wurden einerseits aufwändige, simulierte Lebensdauerests gemacht, andererseits auch bewusst zerstörerische Tests durchgeführt. Auf diese Weise wurden die Schwachpunkte des Designs identifiziert und korrigiert.

Zu den ersten Tests gehörte die Auslagerung der Sensoren bei hohen Betriebstemperaturen wie sie bereits anhand von ①, besprochen wurde. Daneben lässt die Testkombination eines konstant hohen Nominaldruckes bei gleichzeitigem Anlegen der maximalen Temperatur schnell Aussagen über die Stabilität einer Sensortechnologie



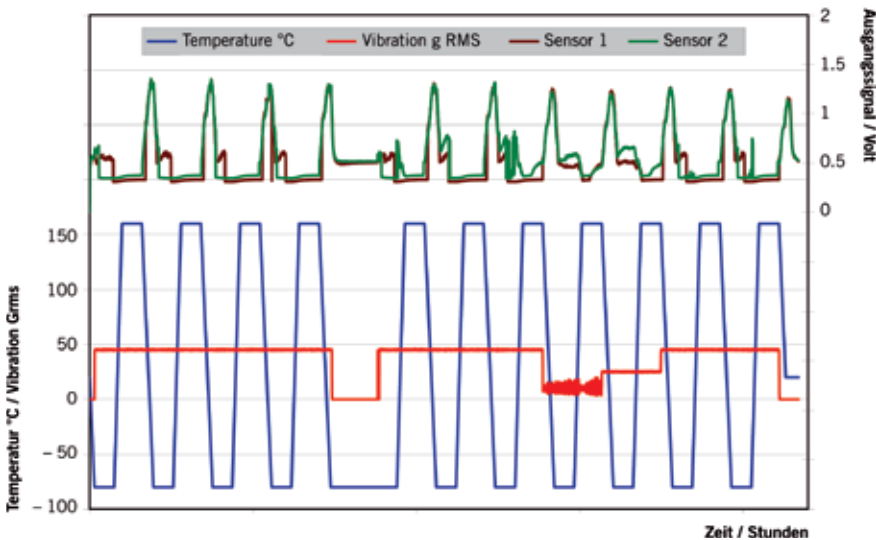
④ Schema der eingesetzten ASIC Technologie – Die Temperaturkompensation des Druckes erfolgt in einem geschlossenen Regelkreis mit einer maximalen Frequenz von 10 kHz

zu. Ein typischer Testlauf umfasst eine 2000 h dauernde Auslagerung des Sensors bei 120 bis 140 °C. Dabei sollten die Driftwerte weniger als 0.5 % FS (FS = Nominaldruckbereich) betragen.

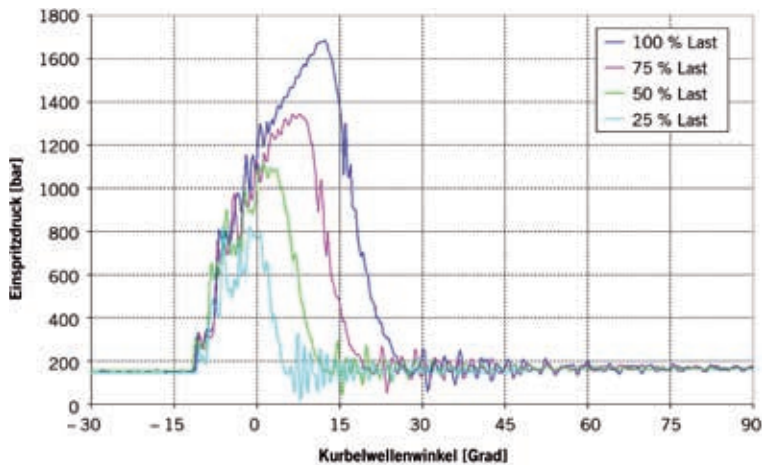
Temperaturschocks (Zeitraum eines Temperaturwechsels unter 10 s bei einer typischen Verweildauer von 30 bis 60 min.) bringen sehr oft präzise Aussagen über Sensordrift, eventuelle Kurzschlüsse, Lötfehler oder Drahtbondbrüche. Ein weiterer, umfangreicher Vortest ist die Vibration der Sensoren über einen längeren Zeitraum hinweg.

Bei diesem 400 Stunden dauernden Test bei gleichzeitigem Temperaturwechsel von -40 bis 135 °C werden die Schwachstellen in der Aufbau- und Verbindungstechnik (Steckverbindungen, lose Teile etc.) aufgedeckt. Einen hervorragenden Einblick in die Thematik geben Wolpi et al. [4].

Schließlich wurden auch beschleunigte Lebensdauerests (Highly Accelerated Lifetime Testing = HALT) durchgeführt, um das Design endgültig zu bewerten. ⑤ zeigt ein Beispiel dieses Tests, der ganz bewusst außerhalb der Sensorspezifikation betrieben wurde. So wurde der Sensor, der eine spezifierte Vibrationsfestigkeit von 25 g RMS in einem Temperaturbereich von -40 bis 125 °C besitzt, einem 50 g Vibrationsstest ausgesetzt. Zugleich wurde die Temperatur in der Prüfkammer von -80 °C bis 160 °C variiert, die Dauer des Temperaturwechsels betrug hierbei nur wenige Sekunden. Zugleich wurde das Ausgangssignal der Sensoren online aufgezeichnet, um den Beginn eines möglichen Verschleißbildes feststellen zu können. Im vorliegenden Beispiel bildeten die Kabelverbinder am Stecker die limitierende Größe. So ist eine gewisse Antwortkurve der Sensoren auf die äußeren thermischen Einflüsse zu erkennen, da die im Test kurzzeitig auftretenden Fehler nicht kompensiert werden. Andererseits sind gewisse erhöhte Signal-zu-Rauschen-Werte erkennbar, die vom Abrieb einer externen Steckverbingung stammen. Die Auswertung der Tests zeigt, dass sich der Sensor nach Abschluss der gewählten



⑤ Kombiniertes Temperatur- und Vibrationstest (HALT) außerhalb der Spezifikationen des Sensors (-80 °C / 160 °C bei konstanter Vibration von 50 g RMS (unten). Das Ausgangssignal zweier Sensoren (oben) zeigt die nicht-kompensierte Reaktion auf die schnellen Temperaturwechsel jedoch auch die Stabilität des Signals nach Beendigung des Tests



6 Einspritzkurven eines Pumpe-Düse-Systems aufgenommen mit einem 8 kHz Drucksensor

Testserie innerhalb seiner Spezifikationen befindet. Beim Trafag-Hochdrucksensor liegt nach Abschluss der Tests noch ein gültiges Signal von 0.5 V ohne Druck vor.

SENSORVALIDIERUNG DURCH EINSATZ AUF GROSSMOTOREN

Aufgrund des beschriebenen medienkompatiblen Designs (keine inneren O-Ringe) konnte der auf Dünnschichttechnik basierende Sensor auf verschiedenen Großmotoren erfolgreich eingesetzt werden. In diesen Schwerölanwendungen werden Kraftstoffe (IFO 700 mit 2 % Schwefel) eingesetzt, die fortwährend auf knapp 150 °C vorgeheizt werden. Es wurden nach 3000 h auf einem Neunzylinder Großmotor im Com-

mon-Rail-Betrieb nur sehr geringe Offsetverschiebungen ($< 0.5\%$ FS) gemessen.

6 zeigt den Einspritz-Druckverlauf eines Hochdrucksensors, der in der Nähe der Einspritzdüse auf einem Großmotor eingebaut wurde. Der Druckverlauf wird bei verschiedenen Motorlasten exakt wiedergegeben. Auch starke und schnelle Druckänderungen sowie die erkennbaren Oszillationen in der Einspritzleitung können fehlerlos und verzugsfrei aufgezeichnet werden. Im Gegensatz zu piezoelektrischen Messverfahren wird der Standarddruck in Bezug zum Umgebungsdruck abgebildet. Die bei einem Pumpe-Leitung-Düse-System (PLD) erzielten Spitzendrücke von bis zu 1600 bar können exakt gemessen und überwacht werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das beschriebene schweißfreie Sensordesign ermöglicht die direkte, genaue und langzeitstabile Messung der pulsierenden Einspritzdrücke am Großdieselmotor unter extremer Temperatur- und Vibrationsbelastung. Die hohe Geschwindigkeit der Signalerfassung von bis zu 10 kHz bietet weitere Optimierungsmöglichkeiten bei der Modulation des Einspritzverhaltens durch die Motorensteuerung. Zusammen mit neuen und kostengünstigen Sensoren für Nadelhubüberwachung und die Zylinderdruckerfassung können die Verbrennungsprozesse in jedem einzelnen Zylinder gezielt optimiert und damit die Emissionswerte von Großmotoren weiter gesenkt werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Bogers M.; Haussner M.; Houben H.; Marto A.; Pechhold F.: Drucksensorglühkerze für Dieselmotoren. In: MTZ 65 (2004), Nr. 11, S. 888-894
- [2] Gerlach G.; Werthschützky R.: 50 Jahre Entdeckung des piezoresistiven Effekts – Geschichte und Entwicklungsstand piezoresistiver Sensoren. In: Technisches Messen 72 (2005), Nr. 1, S. 53-76
- [3] Marines I.; Bin X.; Bathias C.: An Understanding of Very High Cycle Fatigue of Metals. In: International Journal of Fatigue 25 (2003) S. 1101-1107
- [4] Wulpi D. J.: Understanding How Components Fail. ASM International edited by The Materials Information Society (1999)



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.MTZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
order your test issue now:
SpringerAutomotive@abo-service.info