

BERU AG, Mörikestraße 155, 71636 Ludwigsburg, Deutschland

„Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, Tagung 20. September und 21. September 2007, Graz

## **Glühkerze mit integriertem Brennraum-Drucksensor: Eine Schlüsselkomponente zur geregelten Dieselerbrennung**

Glow plug with integrated pressure sensor: a key component  
for closed-loop-combustion control

Dipl.-Ing. Hans Houben, Leiter der Entwicklung  
Co-Autoren: Dr. Bernd Last, Frank Pechhold,  
Christian Pottiez, Entwicklung, BERU AG,  
Mörikestraße 155, 71636 Ludwigsburg, Deutschland  
Michael Weißbäck, AVL List GmbH, Graz, Österreich



### **Kurzfassung**

BERU hat eine Drucksensor-Glühkerze (Pressure Sensor Glow Plug = PSG) entwickelt, die 2007 in Serie geht. Messprinzip ist ein piezoresistives Verfahren, bei dem der Heizstab als Übertragungselement zum Sensor im hinteren Bereich der Glühkerze genutzt wird. Der Messfühler detektiert den Zylinderdruck, den anschließend die Motorsteuerung zur Verbrennungsregelung heranzieht. Mit der Drucksensor-Glühkerze ist erstmalig eine Closed-Loop-Verbrennungsregelung möglich. Sie regelt in erster Linie den Verbrennungsbeginn und -schwerpunkt durch Auswertung des Wärmefreisetzungsverlaufs. Damit lassen sich die zukünftig strenger werdenden Emissionsvorschriften besonders von  $\text{NO}_x$  bei gleichzeitiger Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs erfüllen. Weitere denkbare Anwendungen darüber hinaus sind die dynamische OT-Ermittlung, eine Spitzendruckkontrolle sowie die modellbasierte Abschätzung von EGR,  $\text{NO}_x$  und der Luftmasse.

### **Abstract**

BERU has developed a Pressure Sensor Glow Plug (PSG) which will go into mass production in 2007. The measuring principle is a piezo-resistive process in which the heating rod is used as a transmission element to the sensor in the rear area of the glow plug. The measuring sensor detects the cylinder pressure which the engine control unit then uses to regulate combustion. It is the pressure sensor glow plug which has made closed-loop combustion control possible for the first time in a serial engine. This glow plug controls primarily the start of combustion and the centre point by evaluation of the heat release process. As a result the emission regulations which will become stricter in future, especially with regard to  $\text{NO}_x$ , can be satisfied and at the same time fuel consumption can be reduced. Other conceivable applications also include the dynamic determination of TDC, peak pressure control as well as the model-based assessment of EGR,  $\text{NO}_x$  and the air mass.

„Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, Tagung 20. und 21. September 2007, Graz

## 1. Einleitung

Die zukünftigen Grenzwerte in Europa (EU6) und die aktuellen Emissionsgrenzwerte in den USA (Tier2, BIN5) für Diesel-Pkw erfordern die aktive Abgasnachbehandlung für Partikel und  $\text{NO}_x$ . Mit modernen Partikelfiltersystemen ist die notwendige Partikelreduktion zu erreichen. Für die  $\text{NO}_x$ -Reduktion sind zwei Systeme in der Diskussion: ein SCR-System auf Basis flüssigen Harnstoffes und ein  $\text{NO}_x$ -Speicherkatalysator. Da der realistische Konvertierungsgrad eines  $\text{NO}_x$ -Nachbehandlungssystems begrenzt und aus Kostengründen das Volumen klein zu halten ist, ergibt sich weiterhin die Notwendigkeit, die Rohemission des Motors zu reduzieren [1].

Für den Teillastbereich bieten sich hier Verbrennungsverfahren an, die den Bereich der thermischen  $\text{NO}_x$ -Bildung vermeiden. Diese alternativen Brennverfahren (HCCI, HCLI, HPLI...) sind nicht mehr ohne Weiteres „Open Loop“, wie bisher beim Dieselmotor, steuerbar [2]. Für den Aufbau einer Closed-Loop-Regelung ist der Zylinderdruck als Eingangssignal zu bevorzugen, da er alle zeitbasierten und thermodynamischen Prozessinformationen enthält. Damit kann auch die Langzeitstabilität der Rohemissionen sichergestellt werden. Darüber hinaus sind weitere Potenziale wie dynamische OT-Ermittlung, Spitzendruck-Kontrolle, Zylindergleichstellung, akustische Optimierung, Anpassung an variierende Kraftstoffqualitäten, modellbasierte EGR-,  $\text{NO}_x$ - und Luftmassenabschätzung erkennbar. Die Glühkerze bietet sich aufgrund ihrer Position im Brennraum ideal als Träger für diesen Sensor an.

### Abbildung 1.

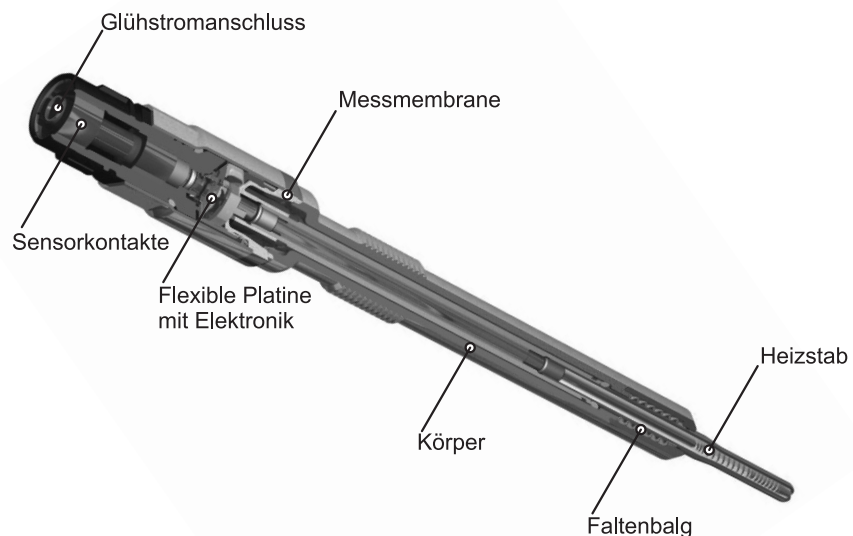


Abbildung 1: Komponenten der Drucksensor-Glühkerze

## 2. Komponenten der Drucksensor-Glühkerze

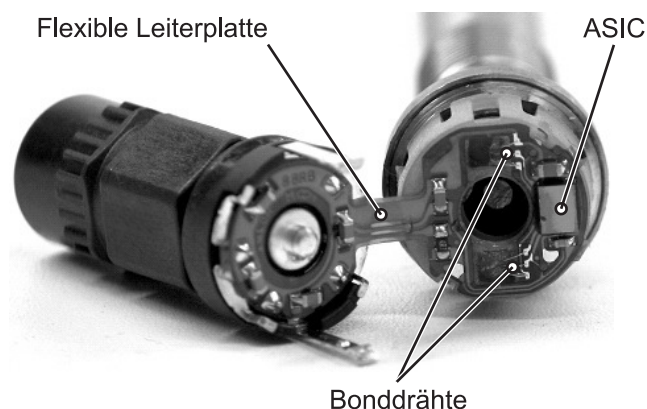
### 2.1 Sensor

Für den Sensor standen drei Messverfahren im Fokus: optisch, piezoelektrisch und piezoresistiv. Zur Entscheidungsfindung zog BERU vor allem fünf wichtige Eigenschaften heran:

- Messgenauigkeit
- Langzeit-Drift
- Robustheit
- Technische Reife und
- Kosten.

Nach intensiven Bewertungen entschied man sich für das piezoresistive Verfahren [3], da es extrem genaue Messwerte mit einer sehr geringen Wertedrift über den gesamten Lebenszyklus vereint. Es handelt sich um die ausgereifte Microfused Strain Gage (MSG)-Technologie, die der Sensorlieferant Sensata Technologies (ST) bereits für die Messung von Brems- und Kraftstoffdruck erfolgreich im Automobilssektor einsetzt.

Eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung des Sensors waren die sehr geringen bestehenden Bauräume (15 mm Durchmesser und 35 mm Bauhöhe). Davon nimmt bereits der Glühstromanschluss einen beträchtlichen Teil ein. Somit war für einen ASIC mit Standard-SO8-Gehäuse nicht genügend Platz vorhanden. Es wurde deshalb eine flexible Leiterplatte mit zwei Ebenen übereinander und einen direkt auf die Platine gelöteten Flip Chip-ASIC gewählt, **Abbildung 2**.



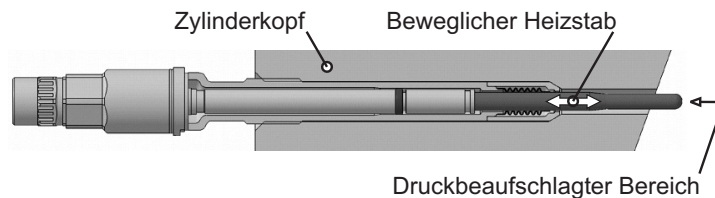
**Abbildung 2:** Sensor mit flexibler Leiterplatte und ASIC

Die bestückte Leiterplatte wird direkt an die Kontaktpins des Steckers gelötet. Die untere Hälfte der Platine wird mit einem Kunststoffträger verklebt, der die mechanische Verbindung zur Messmembran herstellt. Die Membran wandelt das Drucksignal mit Hilfe von aufgebracht Silizium-Dehnmessstreifen in ein elektrisches Signal um.

Das Signal dieser Wheatstoneschen Brücke leiten Bonddrähte an den ASIC auf der flexiblen Leiterplatte weiter. Die Bonddrähte sind in ein Gel eingebettet und dadurch gegen Schwingungsbrüche geschützt. Dieser Aufbau wird von einer Tiefziehkappe aus Edelstahl umhüllt, die mit der Messmembran verschweißt ist. Der an der Tiefziehkappe angeformte Sechskant überträgt die Einschraub- und Lösemomente der PSG bis 30 Nm.

## 2.2 Heizstab und Faltenbalg

Als Basis für die Drucksensor-Glühkerze dient der robuste Heizstab aus dem BERU Diesel-Schnellstartsystem ISS (Instant Start System) [4]. Allerdings wird der Heizstab nicht wie üblich im Glühkerzen-Körper verpresst, sondern ist als bewegliches Teil elastisch gelagert. Er überträgt den Druck auf die Messmembrane, auf der das eigentliche Sensorelement aufgebracht ist, **Abbildung 3**.



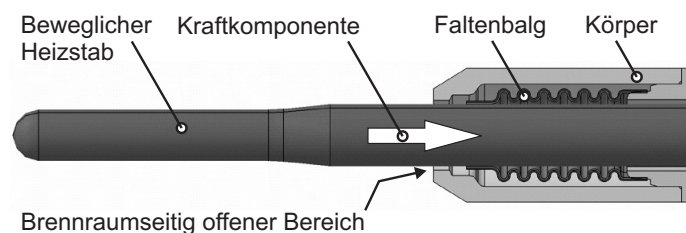
**Abbildung 3:** Schnitt durch die Drucksensor-Glühkerze mit beweglichem Heizstab

Der Sensor ist am hinteren Ende der PSG positioniert, weil nur hier der nötige Bauraum zur Verfügung steht und die Umgebungsbedingungen günstig sind. Der Verbrennungsdruck liegt am vorderen, in den Brennraum hineinragenden Ende der PSG an. Der Übertragungsmechanismus muss daher folgende Anforderungen erfüllen:

- reibungs- und hysteresefreie Übertragung des Verbrennungsdruckes auf das Sensorelement
- Ausgleich der Wärmedehnungen während des Glühbetriebs der PSG
- Entkopplung der Zylinderkopfverformungen vom Sensorelement
- Abdichtung gegenüber dem Brennraum.

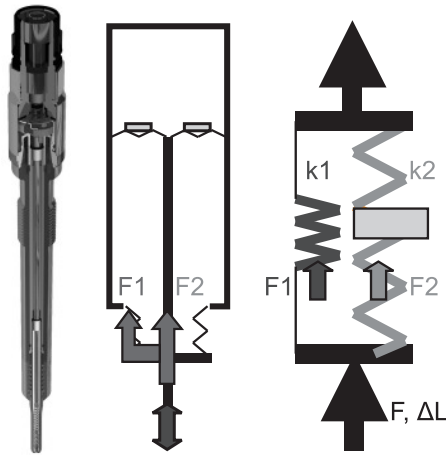
Aus dieser Aufgabenstellung heraus wurde ein beweglicher Heizstab in Verbindung mit einem Faltenbalg als Dicht- und Ausgleichselement entwickelt. Diese Kombination in der Automobiltechnik bewährter Bauelemente erfüllt die gestellten Anforderungen in ausgezeichneter Weise. Der an Heizstab und Faltenbalg anliegende Verbrennungsdruck erzeugt eine Kraftkomponente in Richtung Sensorelement. Die Verformung der Messmembrane wird als sich proportional zum Verbrennungsdruck verändernde Größe vom Sensorelement erfasst und von der Elektronik ausgewertet.

Um die Montage des Faltenbalgs zu ermöglichen, ist der Glühkerzen-Körper zweiteilig ausgeführt und die Wandstärke im unteren Bereich reduziert. Durch den brennraumseitig offenen Aufbau kann das Verbrennungsgas zwischen Faltenbalg und Körper einströmen, wodurch es zu einer hohen thermischen Belastung am Körperunterteil kommt. Aufgrund der Temperaturbelastung besteht der Körper aus einem Edelstahl, der auch bei hohen Temperaturen die nötige mechanische Festigkeit aufweist, um der Montagevorspannkraft ohne plastische Verformung standzuhalten. Andererseits erzeugt diese Konstruktion spezielle Strömungsverhältnisse und wirkt so einer Versottung des Spaltraumes entgegen, **Abbildung 4**.



**Abbildung 4:** Schnitt durch die Drucksensor-Glühkerze mit Faltenbalg.

Da die Steifigkeit des Faltenbalgs relativ klein im Vergleich zur Steifigkeit der kraftübertragenden Baugruppe mit Heizstab, Verlängerung und Sensorelement ist, können über Verformungen des Faltenbalgs sowohl die Verformungen des Zylinderkopfes als auch ein Ausgleich der PSG-internen Ausdehnungen im Glühbetrieb kompensiert werden. Analytisch ist das eine Parallelschaltung zweier Federn wie im Blockschaltbild, **Abbildung 5**, dargestellt.



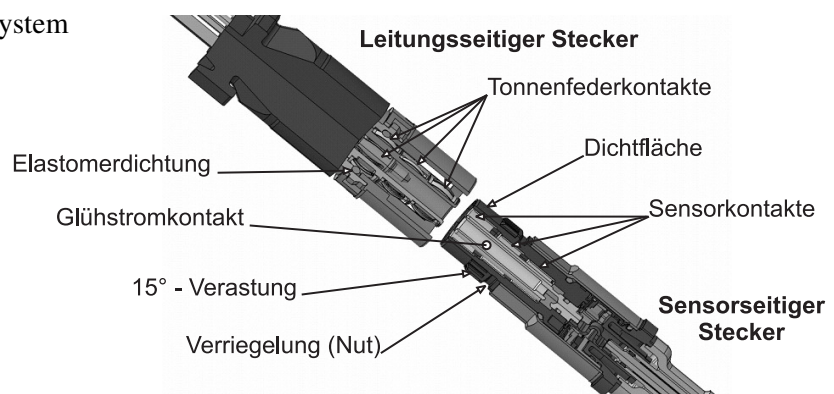
**Abbildung 5:** Kraftfedersystem der PSG

Der Faltenbalg lässt zusätzlich die Bewegungen des Heizstabes in den Druckzyklen zu. Auf Grund dieser Randbedingungen waren die Auslegung seiner Geometrie und die Auswahl des Werkstoffes sehr anspruchsvoll. Sie müssen die relativ großen Bewegungen der Wärmeausdehnung in diesem engen Bauraum zulassen und gleichzeitig bei hoher Temperaturbelastung druckstabil sein. Außerdem darf die Funktion der PSG nicht beeinträchtigt werden. Diese Aufgaben erfüllt am besten ein doppelwandiger Faltenbalg aus einem titanstabilisierten austenitischen Edelstahl. Der metallische Aufbau ermöglicht eine nahezu reibungs- und hysteresefreie Kraftübertragung.

### 2.3 Stecksystem

Ein weiterer innovativer Bestandteil der PSG ist ein koaxiales Stecksystem, eine Gemeinschaftsentwicklung von BERU und Hirschmann Automotive. Es besteht aus einem System aus kabelseitiger Kupplung und glühkerzenseitigem Stecker. Diese Lösung wurde erforderlich, da für die Kombination von etwa sieben Milliampere für den Sensor und fünfzig Ampere für die Glühfunktion kein Serienstecker verfügbar war, **Abbildung 6**.

**Abbildung 6:** Koaxiales Stecksystem



Bei diesem Stecksystem sind die drei Sensorkontakte mit unterschiedlichen Durchmessern auf drei Ebenen konzentrisch um den Glühstromkontakt angeordnet. Diese Neuentwicklung mit einem Außendurchmesser von nur 16 mm auf der Kupplungsseite beansprucht äußerst wenig Bauraum.

Beim Stecken wird der Stecker durch den zentralen Glühstromkontakt geführt und durch eine 15 Grad-Verrastung gegen seitliches Verdrehen geschützt. Durch die kleine Teilung der Verrastung ist trotzdem eine nahezu positionsfreie Steckung möglich. Die Verriegelung erfolgt kraftschlüssig mit Schnapphaken, die in eine Nut am sensorseitigen Kontaktträger einrasten. Eine im Stecker befindliche Elastomerdichtung im oberen Bereich der Glühkerze gewährleistet die Dichtheit des Systems.

Die Entkopplung des Glühstromkontaktes vom beweglichen Heizstab erfolgt mit einer Federverbindung zwischen Innenpol und Glühstromanschluss. Durch die geschlitzten Tonnenfederkontakte des Steckers entstehen hohe Kontaktnormalkräfte, die das Stecksystem sehr vibrationsbeständig machen. Durch die hohe IP-Schutzklasse mit IP69K und eine Temperaturbeständigkeit von -40 bis +150 Grad Celsius werden alle Anforderungen im Motorraum erfüllt.

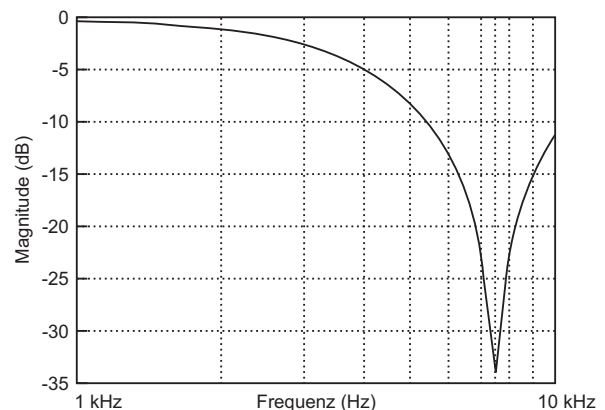
## 2.4 Notch-Filter und dynamische Offsetkompensation (DOC)

Das Funktionsprinzip des beweglichen Heizstabs impliziert Schwingungseinflüsse, die BERU durch einen überlegten mechanischen Aufbau schon weitgehend eliminierte. Da der Heizstab als Übertragungselement für den Druck fungiert, muss durch entsprechende konstruktive Maßnahmen verhindert werden, dass vor allem radiale Schwingungsanregungen das Messsignal beeinflussen. Deshalb sind Membran und Dehnmessstreifen weitgehend symmetrisch gestaltet, so dass diese radialen Komponenten zuverlässig kompensiert werden.

Der Verbund von Heizstab und Verlängerungsrohr ist als Masse an das Messelement angebunden. Das Messelement selbst ist als Verformungskörper gestaltet. Da bei diesen Einzelteilen die Geometrie fest vorgegeben ist, können bauartbedingt axiale Schwingungen nicht vermieden werden. Vereinzelt liegen die Eigenmoden im relevanten Bandbreitebereich von etwa sechs bis zehn kHz.

Um diese axialen Eigenfrequenzen aus dem Sensorsignal weitgehend zu eliminieren, ist ein programmierbarer Notch-Filter in den ASIC integriert. Seine Filterfrequenz ist in einer Bandbreite von sechs bis 25 kHz - abhängig von den spezifischen Umgebungsanforderungen – in Schritten kleiner 0,1 kHz programmierbar, **Abbildung 7**. Gleichzeitig bewirkt der Digitalfilter eine konstante Phasenverschiebung, die in der ECU kompensiert werden kann.

**Abbildung 7: Bode Diagramm Notchfilter**



Zusätzlich zu diesem Notch-Filter ist ein analoger Tiefpassfilter erster Ordnung in die Elektronik integriert, der hochfrequente Störungen wirkungsvoll unterdrückt.

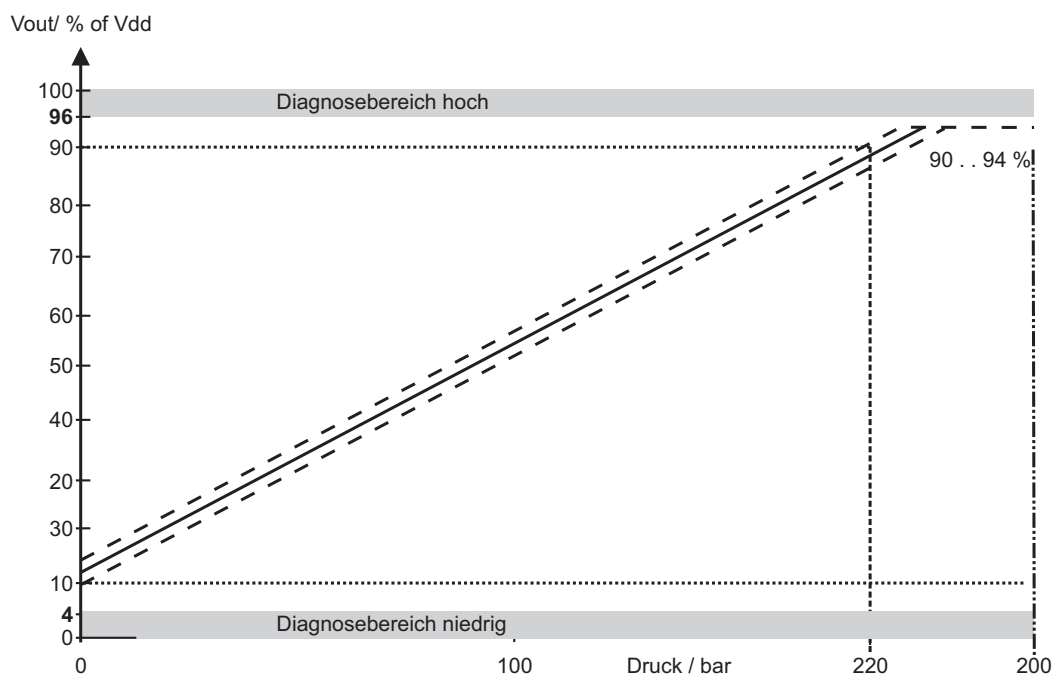
Eine weitere wirkungsvolle Komponente in der Filterkette ist die dynamische Offsetkompensation (DOC). Ihre Aufgabe ist der Ausgleich von Offsetverschiebungen, die durch thermische Längenänderung zwischen Kerzenkörper und Heizstab, hervorgerufen werden. Bei der DOC handelt es sich um einen Hochpass-Filter, der langsame Wechsel bei Gleichstrom herausfiltert, ohne das dynamische Drucksignal zu beeinflussen.

### 3. Messergebnisse der Drucksensor-Glühkerze

Die **Abbildung 8** zeigt die Spezifikation, die aufbauend auf Kundenspezifikationen, von der PSG erreicht wird. Mit einem Druckbereich von 0 bis 200 bar, einem Berstdruck von 260 bar und einer Gesamtzyklenzahl von 500 Millionen Zyklen wird über die gesamte Lebensdauer eine Genauigkeit von  $\pm 2\%$  gewährleistet.

Spezifikation:

Druckbereich:	0 - 200 bar
Prüfdruck:	220 bar
Berstdruck:	260 bar
Versorgungsspannung:	3 V oder 5 V ( $\pm 5\%$ )
Strombelastung:	7 mA max.
Ausgang signal:	11,5 bis 91,5 % of Vs
Bandbreite:	0 bis 5 kHz (-3dB)
Genauigkeit :	$\pm 2\%$
„Low clamp & high clamp“:	6...9 % & 90...94%
Fehlerbänder:	<4% oder >96%

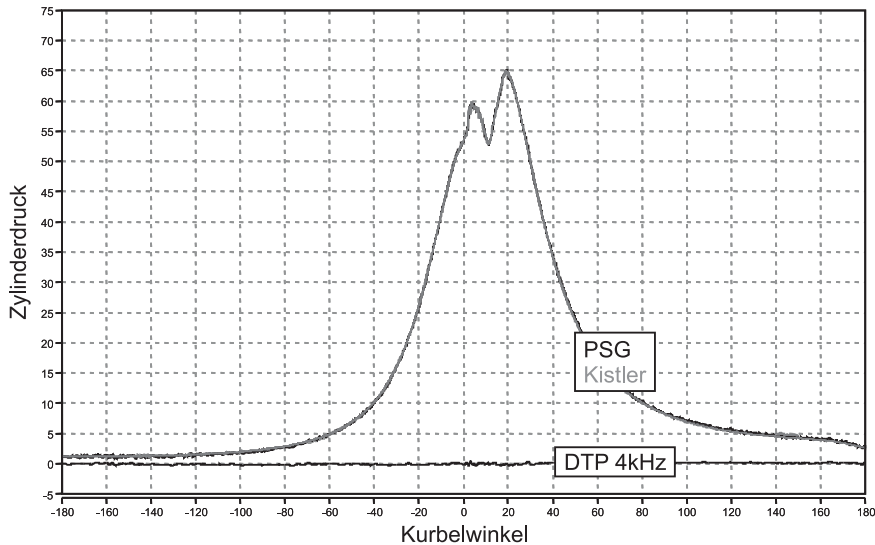


**Abbildung 8: Transferkurve**

Voraussetzung dafür ist eine individuelle Kalibrierung jeder PSG bei Fertigungsende, bei verschiedenen Drücken und Temperaturen. Die Kalibrierparameter werden im ASIC der PSG gespeichert.

### 3.1 Dynamische Messergebnisse

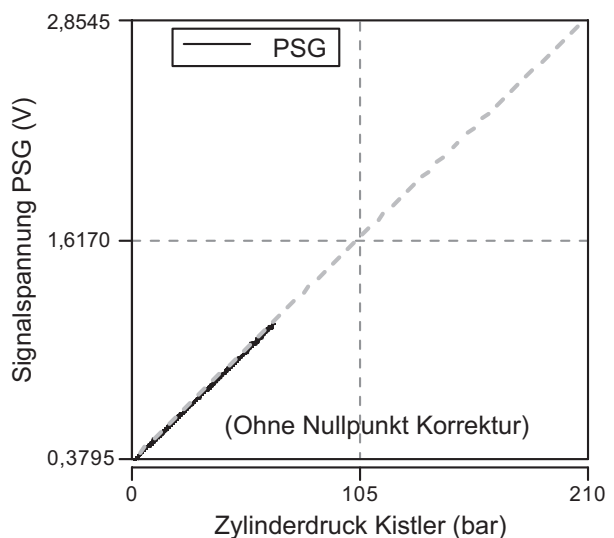
Die Ermittlung des dynamischen Verhaltens der PSG ist am einfachsten in einem Motor mit einem Referenzsensor (Indiziermotor) darstellbar. Exemplarisch sind in **Abbildung 9** bei einer Drehzahl  $n = 1.400$  1/min. und 35% Last beide Druckverläufe und die Differenz dargestellt. Man erkennt die geringe Abweichung der PSG, wobei der Druck mit einer Auflösung von  $0,1$  °KW aufgenommen, eine Nullpunktkorrektur durchgeführt und der konstante Phasenverzug des Notchfilters kompensiert wurde.



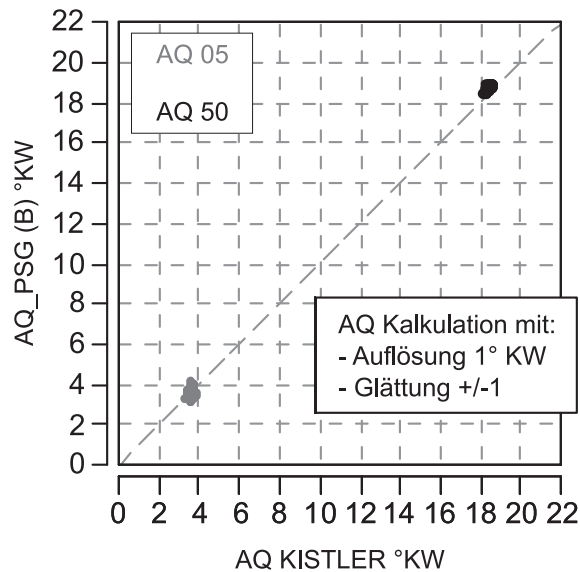
**Abbildung 9:** Druckverläufe und die Differenz der Druckverläufe

Die Darstellung der Druckverläufe in einer Lissajou-Figur, **Abbildung 10**, macht deutlich wie das Signal der BERU Drucksensor-Glühkerze mit dem des Referenzsensors übereinstimmt. In dieser Darstellung wäre auch eine mögliche Hysterese und Schwingungen des Systems sichtbar.

**Abbildung 10:** Vergleich der Druckverläufe und die Differenz der Druckverläufe



Die Darstellung in **Abbildung 11** zeigt die Genauigkeit der thermodynamischen Werte 5 % Umsatz (AQ 5) und Verbrennungsschwerpunktlage (50 % Umsatz = AQ 50), die auf Basis der PSG Signale errechnet wurden im Vergleich zum Referenzsensor. Auch diese sensible Auswertung zeigt die hohe Signalgüte der PSG.



**Abbildung 11:** Vergleich der thermodynamischen Werte von Berechnung und Referenzsensor.

## 4 Anwendung bei der Verbrennungsentwicklung

Mit der Möglichkeit, im Motorbetrieb kontinuierlich den Zylinderdruckverlauf zu messen, eröffnen sich neue Varianten in der Verbrennungsentwicklung. Einerseits kann man durch eine genauere Erfassung des Istzustandes Standardbrennverfahren näher an ihre Grenzen heranführen. Andererseits ist eine zylinderdruckgeführte Verbrennungslageregelung [5] der Schlüssel dazu, neue Brennverfahren auch transient und unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen sicher zu beherrschen. Zusammen mit der AVL hat BERU die PSG am Prüfstand und im Fahrzeug untersucht.

### 4.1 Potenzial der zylinderdruckbasierten Verbrennungslageregelung

Um das Potenzial des Dieselmotors optimal nutzen zu können, müssen die in der Motorelektronik implementierten Steuerungs- und Reglersysteme die Sollwerte zuverlässig einhalten. Bei derzeit eingesetzten Motorsteuerungsstrategien werden der Ladungszustand und die Einspritzparameter durch Vorgabe von Sollwerten und Erfassung der aktuellen Istwerte geregelt beziehungsweise gesteuert. Eine Rückmeldung über den Verbrennungsprozess selbst findet jedoch nicht statt. Es werden also nur zylinderexterne Systemzustände erfasst und die Abweichungen von den geforderten Sollzuständen mit der verfügbaren Aktuatorik bestmöglich minimiert.

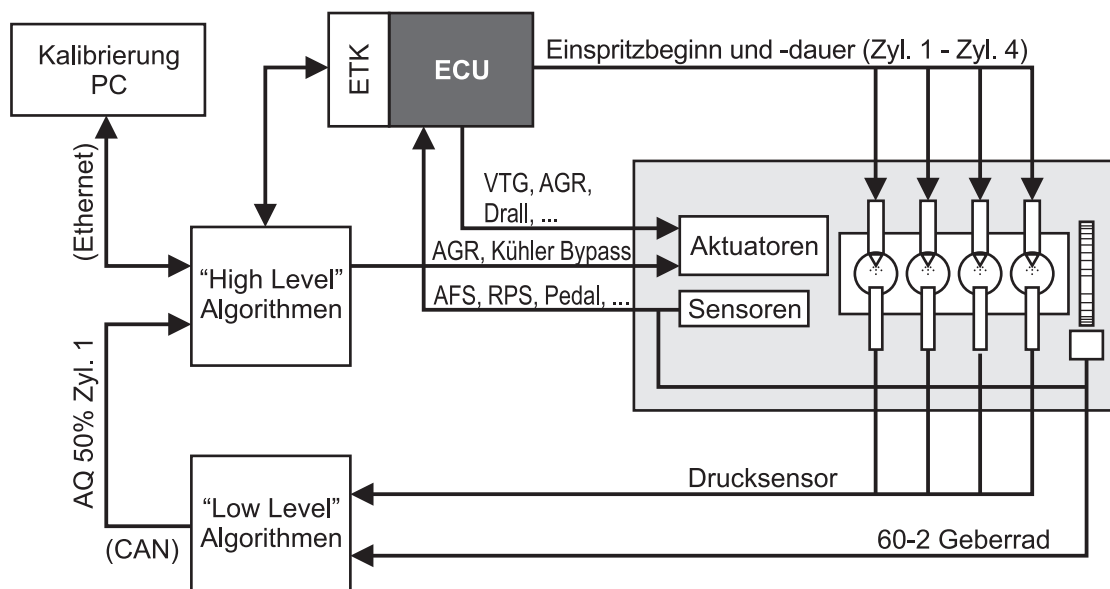
Aus heutiger Sicht ist jedoch für weiterentwickelte konventionelle, als auch neue alternative Brennverfahren insbesondere bei transientem Motorbetrieb eine Prozessrückmeldung erforderlich. Für eine Zustandserfassung der Verbrennung sind zwei Ansätze denkbar: Eine direkte messtechnische Prozessbeobachtung über Zylinderdrucksensoren oder eine modellbasierte Verbrennungsberechnung unter Einbindung der aktuellen Ladungszustände und Einspritzparameter. Eine Kombination aus beiden

Ansätzen scheint sich durchzusetzen. Auf Grund der derzeit verfügbaren Rechenkapazitäten der Motormanagementsysteme ist zunächst aber der sensorbasierte Ansatz höher zu priorisieren.

## 4.2 Zylinderdruckbasierte Regelung von alternativen Brennverfahren

Untersuchungen an einem Forschungsmotor zeigten schnell, dass nur eine echte Regelung der Verbrennung, basierend auf Informationen über den Brennverlauf direkt aus dem Zylinder, die alternative Dieselverbrennung [6] in relevanten Bereichen des Mitteldruckes praxistauglich machen kann. In einem ersten Schritt wurden daher aus dem Signal des Zylinderdrucksensors in Echtzeit geeignete Regelgrößen bestimmt. Als sinnvolle Regelgrößen wurden einerseits der Verbrennungsschwerpunkt (AQ 50) als Maß für den Zündverzug sowie optional der maximale Druckanstieg als Maß für die EGR-Rate identifiziert.

Für die zylinderdruckbasierte Verbrennungslagenberechnung und -regelung wird das Signal des Zylinderdrucksensors zusammen mit einem serienmäßigen Kurbelwellengebersignal den „Low Level Algorithmen“ zur Verfügung gestellt, **Abbildung 12**.

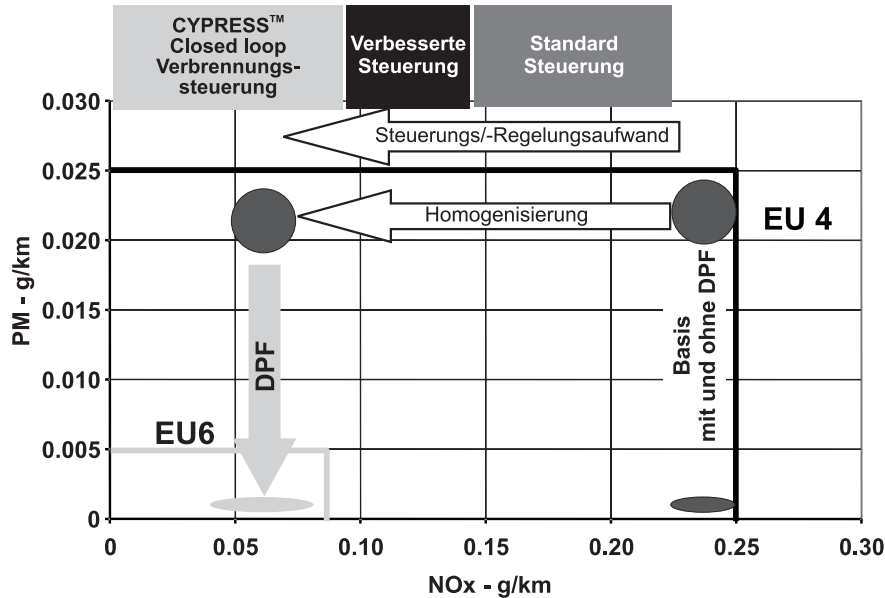


**Abbildung 12:** Darstellung des verwendeten Hard- und Softwaresystems

Basierend auf einem 60-2 Geberrad wird die Lage des 50 % Massenumsatzpunktes (AQ 50), der indizierte Mitteldruck, der Wert und die Lage des maximalen Druckanstieges sowie des Zylinderspitzendruckes ermittelt. Die Ergebnisse stehen nach jeder Verbrennung zur Verfügung und werden per CAN-Bus an die „High Level Algorithmen“ übergeben. Im Entwicklungssteuergerät wird mit dem Algorithmus einer adaptiven Reglerstrategie aus der Differenz zwischen dem Sollwert für die Lage des 50% Massenumsatzpunktes (AQ 50) und dem per CAN-Bus empfangenen Istwert ein neuer Zeitpunkt für die nächste Einspritzung ermittelt. Die Regelung der Verbrennungslage kann mit dem beschriebenen System entweder auf einem auswählbaren Führungszyylinder oder zylinderselektiv erfolgen.

### 4.3 Emissionsergebnisse

Ausgehend von einem EU4-Abgasstandard, konnten durch zunehmende Homogenisierung auch hin zu höheren Lasten bei AVL in Demonstrationsfahrzeugen  $\text{NO}_x$ - Rohemissionen unterhalb des diskutierten EU6-Grenzwertes erreicht werden, **Abbildung 13**.

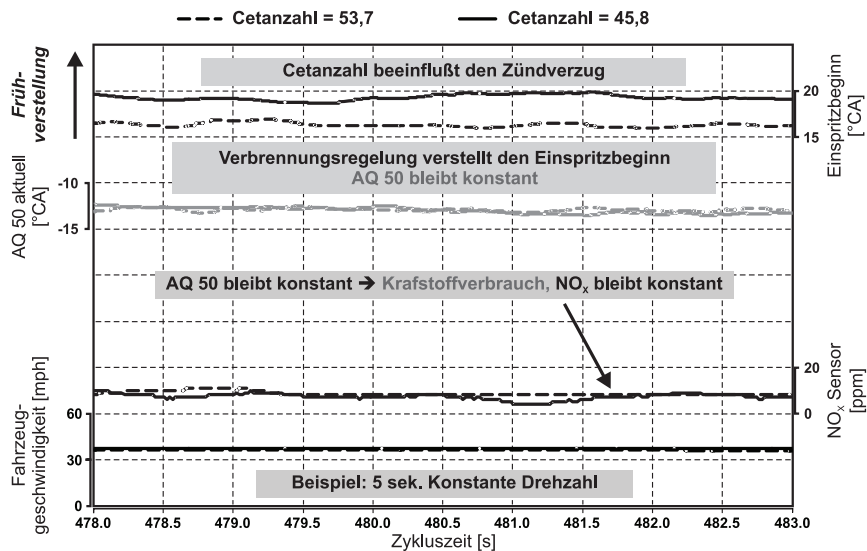


**Abbildung 13:** NEDC Rollenergebnisse mit teilhomogenen Brennverfahren in Verbindung mit zylinderdruckgeführter Verbrennungslagenregelung

Unterhalb eines  $\text{NO}_x$ -Wertes von etwa 0,1 g/km im NEDC-Test ist eine zylinderdruckgeführte Verbrennungslagenregelung für eine ansprechende und stabile Fahrbarkeit unabdingbar. Weiterhin sind entsprechende Maßnahmen zu entwickeln, um die erhöhten HC- und CO-Emissionen in Zukunft besser beherrschen zu können. Die bisher bei Prototypfahrzeugen angewandten Verbrennungs- und Regelstrategien (CYPRESS™) werden weiter entwickelt [7], um möglichst viele Vorteile auch unter Serienrandbedingungen darstellen zu können, ohne dabei allzu große Emissionskompromisse eingehen zu müssen.

### 4.4 Kraftstoffqualität

Eine weitere Nutzung der PSG-Signale besteht in der Kompensation unterschiedlicher Zündverzüge. Insbesondere für US-Applikationen mit einer breiten Streuung der Cetanzahl ist eine langzeitstabile Emissionskontrolle darstellbar. Im FTP75 Zyklus wurden bei unveränderter Kalibrierung Kraftstoffe mit einer Cetanzahl von 52 und 46 verwendet. Zur Kompensation des verlängerten Zündverzugs bei Cetanzahl 46 ist eine Frühverstellung des Einspritzbeginns von etwa 4 °KW erforderlich. Bei gleicher Lage des Verbrennungsschwerpunktes ergeben sich keine Unterschiede bei Kraftstoffverbrauch und  $\text{NO}_x$ -Emission, **Abbildung 14**.



**Abbildung 14:** Kompensation unterschiedlicher Cetanzahlen durch eine zylinderdruckgeführte Verbrennungslagenregelung

### Ausblick

Nach Meinung von AVL und BERU sind bei weitem noch nicht alle Möglichkeiten der Zylinderdrucksensorik ausgeschöpft. Mit der Weiterentwicklung der Regelkonzepte lassen sich weitere Vorteile wie beispielsweise Kaltstart- und Kaltlaufoptimierung, Closed-Loop-Momentenregelung sowie Leistungssteigerung durch laufendes Spitzendruckmonitoring und verbesserte Emissionsstabilität über der Motorlebensdauer realisieren.

### Literaturhinweise

- [1] Breitbach, H., Enderle, C., Lindemann, B., Paule, M., Schommers, J., Stotz, M.: Weltweite Emissionsstrategie mit BLUETEC für Pkw-Diesel-Antriebe; 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2006
- [2] Bürgler, L., Cartus, T., Herzog, P., Neunteufl, K., Weißbäck, M.: Brennverfahren, Abgasnachbehandlung, Regelung – Kernelemente der motorischen HSDI Diesel Emissionsentwicklung, 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2004
- [3] Borgers, M., Haußner, M., Houben, H., Marto, A., Pechhold, F.: Drucksensor-Glühkerze (PSG) für Dieselmotoren. In: MTZ (65) 2004, Nr.11, S. 888-895
- [4] Endler, M., Houben, H., Schmitz, H.-G., Uhl, G.: Das elektronisch gesteuerte Glühsystem ISS für Dieselmotoren. In: MTZ (61) 2000, Nr. 10, S. 668-676
- [5] Breitegger, B., Hülser, H., Neunteufl, K., Unger, E.: Eine zylinderdruckbasierte Motorregelung für niedrigste Emissionen beim Dieselmotor. 5. Symposium Steuerungssysteme für den Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen, Berlin, 2005

[6] Csato, J., Glensvig, M., Herzog, P., Sams, T., Weißbäck, M.: Alternative Brennverfahren - Ein Ansatz für den zukünftigen PKW-Dieselmotor. In: MTZ (64) 2003, Nr. 9, S. 718-727

[7] Bürgler, L., Glensvig, M., Neunteufl, K., Weißbäck, M.: Fahrzeugapplikation mit alternativer Dieselerbrennung. In: MTZ (66), 2005, Nr.11, S. 866-871