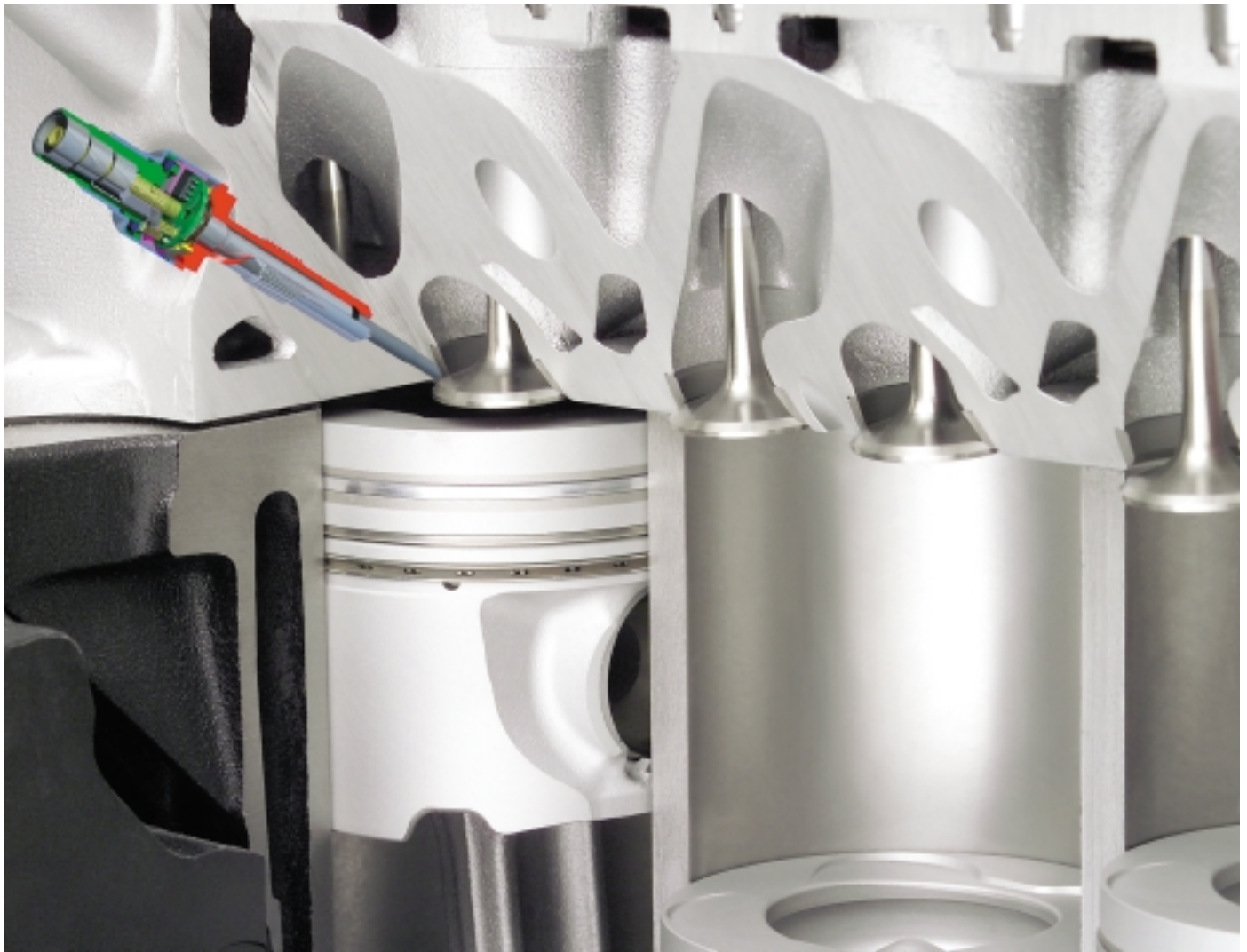


Drucksensor-Glühkerze für Dieselmotoren – Pressure Sensor Glow Plug (PSG)

Sonderdruck aus der
Motortechnischen Zeitschrift (MTZ)



Drucksensor- Glühkerze (PSG) für Dieselmotoren

Künftige Emissionsgrenzwerte für Diesel-Fahrzeuge erfordern eine weitere drastische Reduktion der Abgaskomponenten Partikel und Stickoxid. Da aus heutiger Sicht allein mit den Maßnahmen der Verbrennungsabstimmung diese Werte nicht darstellbar sind, wird die aktive Abgasnachbehandlung im Dieselmotor fester Technologiebaustein. Zusätzlich muss durch eine Closed-Loop-Regelung die Verbrennung optimiert werden, um auch die Rohemissionen deutlich zu reduzieren. Die Beru AG hat dazu einen Brennraumdrucksensor (Pressure Sensor Glow Plug - PSG) entwickelt, der in die Glühkerze integriert ist.

1 Einleitung

Die künftigen Abgas-Grenzwerte für Diesel-Motoren in den USA und Europa liegen bei etwa 10-20 % bezogen auf die aktuellen Werte, **Bild 1**. Die dabei angestrebte Partikelreduktion scheint – auch über die geforderte Lebensdauer – mit Abgasfiltersystemen erreichbar. Um jedoch auch die geforderten NO_x -Ziele darzustellen, reichen die heute bekannten Nachbehandlungsmaßnahmen alleine nicht aus. Es gilt daher zusätzlich, die Rohemission der Motoren deutlich zu verbessern. Deshalb wird weltweit intensiv an verschiedenen Brennverfahren wie HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), HCLI (Homogeneous Charge Late Injection), HPLI (Highly Premixed Late Injection), DCCS (Dilution Controlled Combustion System) geforscht, da sich alle diese Verfahren durch sehr niedrige NO_x -Emissionen auszeichnen.

In der Kombination von optimierter Verbrennung und Abgas-Nachbehandlung scheinen die Emissions-Grenzwerte der nächsten Stufe erreichbar. Möglicherweise kann sogar vollständig auf eine NO_x -Nachbehandlung verzichtet werden.

Den genannten Brennverfahren ist aber eines gemeinsam: Die Zündung erfolgt in Abhängigkeit des Gemischzustands und ist daher nicht mehr „open loop“, wie bisher beim Dieselmotor üblich, darstellbar. Für den Aufbau einer „Closed-Loop“-Verbrennungsregelung sind jedoch Informationen aus dem Brennraum erforderlich. Dies kann beispielsweise mittels eines Sensors erfolgen, der die benötigten Daten zur Regelung liefert [2]. Aus konstruktiver Sicht sind jedoch zusätzliche Bohrungen im Zylinderkopf zu vermeiden. Dies gilt besonders für moderne Vierventilköpfe mit ihren beschränkten Platzverhältnissen.

Für die Firma Beru als Spezialist für Diesel-Kaltstarttechnik und weltweit größtem Hersteller von Glühkerzen sind die hier skizzierten Rahmenbedingungen eine besondere Herausforderung, das Projekt unter dem Gesichtspunkt „Glühkerze mit Brennraum-Sensorfunktion“ in Angriff zu nehmen – nimmt doch die Glühkerze aufgrund Ihrer Hauptfunktion des dieselmotorischen Kaltstarts eine gemischtoptimierte Position im Brennraum ein. Sie bietet sich deshalb ideal als Träger für einen solchen Brennraum-Sensor an. Die Ergebnisse verschiedener Konzeptuntersuchungen zur Entwicklung einer Glühkerze mit Brennraum-Sensorfunktion sind im Folgenden dargestellt.

2 Entwicklungsziele

In Bezug auf die Kundenbedürfnisse wurden die Entwicklungsziele formuliert, bei de-

nen folgende Anforderungen erfüllt sein sollen:

- keine Beeinträchtigung der Glühfunktion
- die Miniaturisierung des Gesamtsensors wegen der Bauraumbeschränkung im Zylinderkopf
- ein robustes und genaues, statisches Messverfahren
- keine Querempfindlichkeit des Sensors, insbesondere auf Körperschallsignale
- die Erarbeitung eines modularen Systems, um den Sensor für unterschiedliche Glühkerzen verwenden zu können
- die Sicherstellung einfacher Montage bei den Kunden (im Idealfall wie bei einer heutigen Glühkerze).

3 Untersuchte Sensorkonzepte

Vier aus Sicht des Beru-Entwicklungsteams für das Ziel grundsätzlich geeignete Messverfahren wurden in die näheren Voruntersuchungen einbezogen: Ionenstrom-Messung, optische Druckmessung, piezo-elektrische Druckmessung und piezo-resistive Druckmessung.

3.1 Ionenstrom-Messung

Während des Verbrennungsvorgangs entstehen thermisch und chemisch bedingt Ionen, so dass durch Anlegen einer Spannung an eine Sonde, ein vom Verbrennungsvorgang abhängiger Ionenstrom messbar ist [3].

Zur Messung dieses Ionenstroms mittels einer Glühkerze muss der in den Brennraum ragende Heizstab elektrisch vom Körper und damit vom Zylinderkopf getrennt sein. Dies wird im Inneren durch eine verpresste Kunststoffhülse und im äußeren Bereich durch eine Glas-Keramik-Beschichtung des Heizstabes erreicht. Um den klassischen, einpoligen elektrischen

Die Autoren



Dipl.-Ing. Hans Houben ist Leiter der Entwicklung bei der Beru AG in Ludwigsburg.



Dipl.-Phys. Ing. Arno Marto leitet die Sensorentwicklung bei der Beru AG in Ludwigsburg.



Dipl.-Ing. (FH) Frank Pechhold leitet den Fachbereich Konstruktion in der Sensorentwicklung bei der Beru AG in Ludwigsburg.



Michael Haußner ist Mitarbeiter in der Abteilung Diesel-Kaltstarttechnik bei der Beru AG in Ludwigsburg.



Marc Borgers führt das Texas Instruments-Team zur Integration der Sensorfunktion in Glühkerzen mit der Beru AG.

1 Einleitung

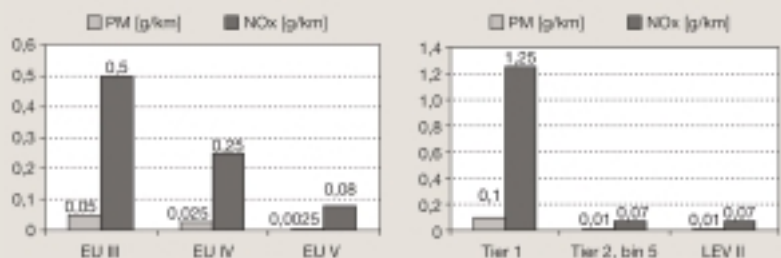


Bild 1: Derzeitige und künftige Emissionsgrenzwerte für Pkw-Diesel-Motoren in Europa links und den USA

Anschluss der Glühkerze behalten zu können, ist im oberen Teil eine Diode integriert, die beim Anlegen einer positiven Spannung die Glühfunktion durchschaltet und bei negativer Spannung die Ionenstrom Messung ermöglicht, **Bild 2**.

Das System [3] wurde bis zum B-Musterstand mit mehreren 1000 Betriebsstunden erprobt. Die Signalauswertung zeigt, dass in erster Näherung eine Korrelation mit dem Wärmefreisetzungsverlauf besteht. Dabei lassen sich die wesentlichen zeitbasierten Größen wie Verbrennungsbeginn von Vor- und Haupteinspritzung sicher erfassen. Ebenfalls können die Voreinspritzung durch Kalibrierung der Injektor-Bestromung über die Lebensdauer des Motors konstant klein gehalten und Verbrennungsaussetzer oder Düsennadel-Probleme erkannt werden. Allerdings sind weitere thermodynamische Größen nur indirekt und auch nur bedingt erfassbar.

3.2 Optischer Drucksensor

Es wurde ein optischer Drucksensor eingesetzt, der mit einem Außendurchmesser von nur 1,7 mm die Integration in eine Glühkerze erlaubt. Das Messprinzip des Sensors basiert auf einer klassischen Druckmembrane. Gegenüber der verspiegelten Innenseite sind zwei Lichtleitfasern angeordnet, wobei über eine Faser Licht eingespeist wird und über die zweite Faser ein reflektiertes, druckproportionales Signal empfangen werden kann.

Positiv ist die erreichte Genauigkeit des Sensorsignals, kritisch werden der nicht unerhebliche konstruktive Aufwand für die Glühkerzenintegration, die Verkockungsgefahr der Zuführungskanäle sowie die opto-elektrische Umsetzung gesehen.

3.3 Piezo-elektrischer Sensor

Im Klopfsensor am Motorkurbelgehäuse wird heute meist ein piezo-keramisches Messelement auf Bleizirkonat-Titanat-Basis (PZT) verwendet, das in einem Feder-Masse-System eingebunden, die auftretenden Beschleunigungen aufnimmt und in elektrische Ladung umwandelt [1, 4].

In **Bild 3** ist die konstruktive Integration eines ringförmigen, piezo-keramischen Elementes in eine Glühkerze dargestellt. Dabei wird das Messelement kontaktiert und entsprechend isoliert zwischen dem Innenpool und dem Glühkerzenkörper über eine Mutter vorgespannt. Im Zylinderkopf eingebaut, erzeugt der Brennraumdruck eine Kontraktion von Glühkerzenkörper und Zylinderkopfboden und damit eine Relativbewegung zwischen Glühkerzen-Innenpol und -körper [1]. Die dadurch hervorgerufene Ladungsänderung am Piezoelement kann an den Kontakten gemessen werden

3.1 Ionenstrom-Messung



Bild 2: Aufbau einer Glühkerze mit Ionenstrom-Messfunktion

3.3 Piezo-elektrischer Sensor

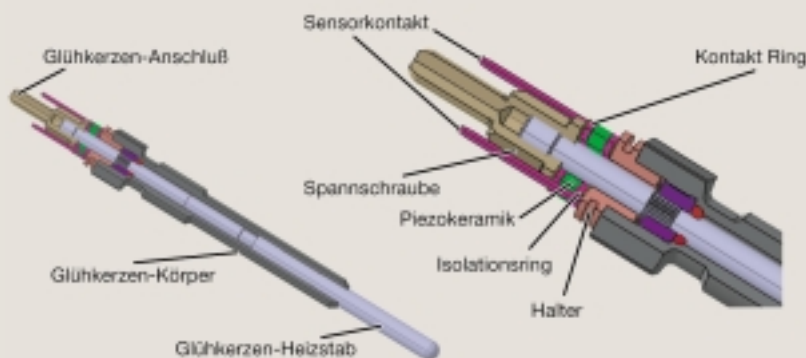


Bild 3: Aufbau eines Piezo-elektrischen Brennräum-Drucksensors

Grundsätzlich positiv ist bei dieser Konstruktion der Ansatz, den Sensor nicht dem Brennraum direkt auszusetzen, sondern die Glühkerze als Übertragungselement zu benutzen. Dadurch werden bekannte Probleme der Temperaturfestigkeit und des Thermoschocks vermieden.

Die von Beru durchgeführten Untersuchungen an verschiedenen Motorbetriebspunkten zeigen allerdings, dass dieses Konzept zwar eine gute Genauigkeit im Hochdruckteil bringt, sich jedoch Abweichungen im Niederdruckteil ergeben. Zudem werden mit wachsender Drehzahl hochfrequente Störungen festgestellt.

Dies ist auf die Konstruktion zurückzuführen, da letztlich die Glühkerze und der Zylinderkopf als Überträger zum Messelement dienen und damit auch Körperschall-Ereignisse benachbarter Motorkomponenten erfasst werden. Weiterhin werden die Messung geringer Ladungsänderungen und die Langzeitstabilität polykristalliner Piezokeramiken von Beru kritisch gesehen.

3.4 Piezo-resistiver Sensor

Im Automobilbereich sind Drucksensoren, die auf piezo-resistiver Basis arbeiten, sehr verbreitet. Die Technik ist breit eingeführt und bewährt. Sie zeichnet sich durch hohe Genauigkeit, Langzeitstabilität und Kalibrierbarkeit aus. Auf dieses Messprinzip soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

3.5 Bewertung der verschiedenen Sensorsysteme

Die **Tabelle** stellt die Vor- und Nachteile der vier betrachteten Konzepte gegenüber. Nach Bewertung der hier dargestellten Methoden hinsichtlich der Entwicklungsziele verspricht die Weiterführung der piezo-resistiven Variante am meisten Erfolg.

4 Entwicklungsschwerpunkte

Als besondere Schwerpunkte für die Entwicklung einer solchen Drucksensor-Glühkerze (Pressure Sensor Glow Plug, PSG) wurden dabei vom Beru-Projektteam definiert:

3.5 Bewertung der verschiedenen Sensorsysteme

Tabelle: Bewertungsmatrix der vier untersuchten Systeme

Technik	Ionenstrom	Optisch	Piezo-elektrisch	Piezo-resistive
Genauigkeit	-	++	+	++
Stabilität des Signals	+	++	-	++
Kosten	-	--	+	+
Robustheit	+	-	+	++
Ausgangssignal	-	++	+	++
statische Druckmessung	--	++	--	++

se neue Anforderungen stellt. Glührohr und Innenpol sind verlängert und ragen am oberen Ende aus dem Glühkerzenkörper. Dort wird die Messmembrane mit Körper und Glührohr verschweißt.

Um die thermische Belastung sicher zu beherrschen, wird ein Heizstab des Beru-Instant-Start-Systems ISS [5] verwendet, der aufgrund der Anordnung von Heiz- und Regelwendel nur in der Spitze glüht. Auch im Hinblick auf künftige Serieneinsätze bietet sich diese Lösung an, da inzwischen alle deutschen Autohersteller Diesel-Aggregate – zumindest optional – mit ISS offerieren.

Der Heizstab ist bei der PSG im Glühkerzenkörper elastisch gelagert und überträgt den Druck als Kraft auf eine Membrane. Dadurch befindet sich der eigentliche Drucksensor fern vom Brennraum in einem Bereich deutlich günstigerer Umgebungsbedingungen, **Bild 4**.

Im Sinne einer ganzheitlichen Systemlösung, die es ermöglicht, auch die PSG wie eine konventionelle Glühkerze sowohl in der Serien- als auch in der späteren Werkstatt-Montage zu verwenden, wurde ein den besonderen Anforderungen entsprechendes Stecksystem entwickelt.

Dabei sind die drei erforderlichen Sensorkontakte konzentrisch um den Hochstromkontakt mit unterschiedlichem Durchmesser auf drei Ebenen angeordnet. Die Abkoppelung des Steckers vom beweglichen Heizstab erfolgt für die Sensorkontakte über Federkontakte und durch die spezielle Ausbildung des Hochstromkontaktes am Innenpol der Glühkerze. Mit einem Außendurchmesser von nur 16 mm im gesteckten Zustand ist es gelungen, den Sensor im Bauraumbedarf äußerst gering zu halten. Die dargestellte Ausführung erlaubt eine voneinander unabhängige Glüh- und Druckmessfunktion.

5.1 Mechanischer Aufbau

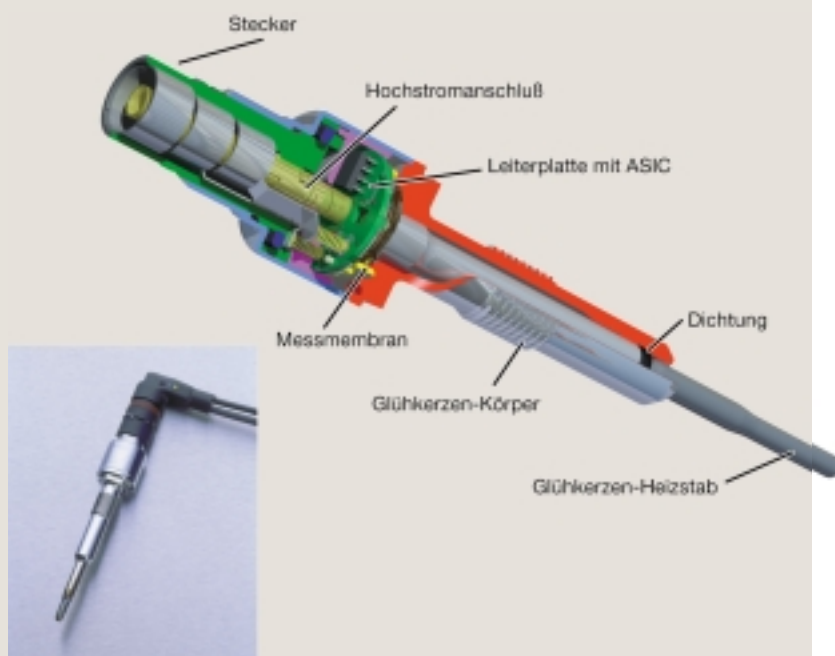


Bild 4: Schematischer Aufbau der Drucksensor-Glühkerze PSG

- hohe Integration des Sensorelements und der Elektronik in die Glühkerze durch geeignete Aufbau- und Verbindungstechnik
- Entwicklung eines automatisierbaren Fertigungsverfahrens
- Temperatur-Entkoppelung von Brennraum und Sensorelement durch einen beweglichen Heizstab als Druckübertrager
- Entwicklung eines koaxialen, kleinbauenden Stecksystems mit integriertem Hochstromanschluß
- mechanische Entkopplung des Hochstromanschlusses vom Heizstab als Druckübertrager.

5 Drucksensor-Glühkerze

Die von Beru forcierte Entwicklung der PSG entsteht in enger Kooperation mit Texas Instruments Holland B.V., die für die Konzeption und Umsetzung des zu integrierenden Sensorbauteils zuständig sind.

5.1 Mechanischer Aufbau

Einen wesentlichen Konzeptpunkt stellt der mechanische Aufbau der Glühkerze dar. Dazu wird der Heizstab, der üblicherweise in den Glühkörper dicht eingepresst ist, beweglich ausgeführt, was in Bezug auf die Abdichtung gegen heiße Brennga-

5.2 Messprinzip

Die Druckmessung basiert auf der „Micro-fused Strain Gage“-Technik (MSG) von Texas Instruments. Sie ermöglicht es, hermetisch dichte, genaue und fehlersichere Sensoren kostengünstig herzustellen. Verwendet werden dazu mikromechanische, monokristalline Silizium-Dehnmessstreifen, die als Wheaton'sche Brücke mit einem niedrigschmelzenden Glas auf eine Edelstahlmembran gebondet sind, **Bild 5**. Diese Technik erlaubt die Verwendung unter den rauen Bedingungen des Motorbaus. Diese bewährte Methode wird heute für Bremsdruck-Messung (ESP), Raildruck-Messung (CR), Kraftstoff-Druck (GDI) und zur Druckmessung im Getriebe verwendet. In der PSG Applikation wird der Druck über die Heizstabfläche in eine Kraft gewandelt

5.2 Messprinzip

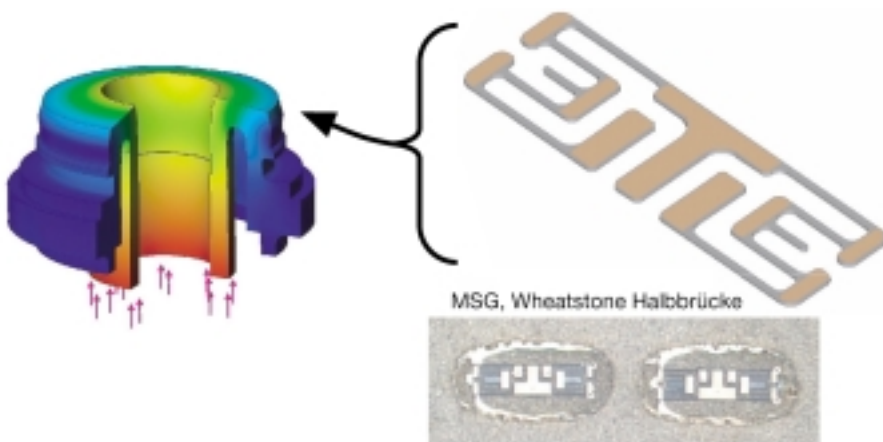


Bild 5: Die Metallmembran als FEM-Modell mit der Wheatstone-Brücke

5.3 Auswerteelektronik

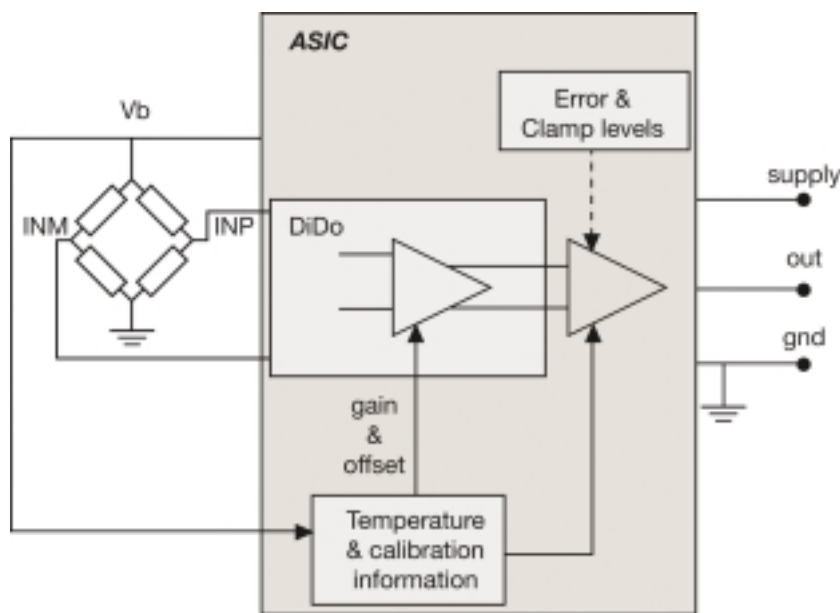


Bild 6: Der ASIC mit seinen Funktionen

und zum Sensorelement übertragen, das so vom heißen Bereich des Brennraumes entkoppelt ist. Die Edelstahlmembran wird durch die Kraft verformt. Diese bewährte Methode wird heute für Bremsdruck-Messung (ESP), Raildruck-Messung (CR), Kraftstoff-Druck (GDI) und zur Druckmessung im Getriebe verwendet.

Mithilfe der Methode der Finiten Elemente (FEM) wurde die Membran hinsichtlich des statischen Verhaltens (Empfindlichkeit und Überdruckfestigkeit), aber auch der dy-

namischen Eigenschaften optimiert. Zum Beispiel konnte die Eigenfrequenz auf 17 kHz und damit in einen für den Motoranbau unkritischen Bereich verschoben werden. Auch bei thermischen Berechnungen kam die FEM-Methode zur Anwendung. Die großen Vorteile des piezo-resistiven gegenüber dem piezo-elektrischen Verfahren bestehen in der Möglichkeit, statische Drücke (also auch die „Nulllinie“) messen zu können sowie die geringere Drift – insbesondere der Verstärkung – über die Lebensdauer.

5.3 Auswerteelektronik

Für die Weiterverarbeitung der Signale der Wheatstone'schen Brücke entwickelt Texas Instruments einen entsprechenden ASIC, dessen Blockschaltung in **Bild 6** dargestellt ist.

Das ASIC-Design ist speziell auf diese Applikation abgestimmt: hohe Bandbreite (bis 10 kHz), geringes Rauschen, Temperaturkompensation und steckerprogrammierbar. Die Temperaturkompensation eliminiert Offset- und Verstärkungsfehler über den gesamten Temperaturbereich. Das Temperatursignal liefert die Messmembran, nicht der ASIC, so dass wegen der Erfassung der motornahen Temperatur keine zusätzlichen Fehler in der Kompensation zum Tragen kommen. Bei einer weiteren Beschränkung des Bauraumes kann der ASIC in Flip-Chip-Technik auf einem Flexboard verbaut werden.

Standard-Diagnosefunktionen sind im ASIC für interne (wire bonds) und externe Fehler (Kabel) integriert. Der Signalpegel geht dann in ein Fehlerband, so dass das Steuergerät den Defekt des Sensors oder der Kontaktierung erkennen kann.

5.4 Spezifikation

Die Entwicklungsziele führten zu den unten aufgeführten Sensor Kenndaten.

- Versorgungsspannung 5 V
- Versorgungsstrom <15 mA
- Signalspannung 0,5 .. 4,5 V
- Temperaturbereich -40 .. 125 °C
- Messbereich 0 .. 200 bar
- Überdruck 220 bar
- Fehler (Linearität, Hysterese) +/- 2 % FSO
- Temperaturfehler +/- 2 % FSO
- Bandbreite 10 kHz

6 Messergebnisse

Erste Messergebnisse mit A-Mustern an einem Common-Rail-Pkw-Dieselmotor zeigten noch starke Abweichungen vom Indizersensor der Firma Kistler, der als Referenzsensor verwendet wurde. Die Ursache lag zum einen in einem 2-kHz-Rauschen und einer Phasenverschiebung der dabei verwendeten Auswerteelektronik. Zum anderen kamen die Eigenfrequenzen des Sensors zum Tragen. **Bild 7** zeigt die Signalverläufe der Muster bei verschiedenen Drehzahl und Lastzuständen im Vergleich zum Referenzsensor.

Der Sensor, bei dem es sich um ein Masse-Feder-Dämpfer-System aus Heizstab, Messmembran und Dichtung handelt, zeigt eine Eigenresonanz zwischen 7 und 11 kHz. Durch Reduzierung des Heizstabgewichts und eine erhöhte Steifigkeit der Membran ist es gelungen, die Eigenfrequenz über 17 kHz zu verschieben.

6 Messergebnisse

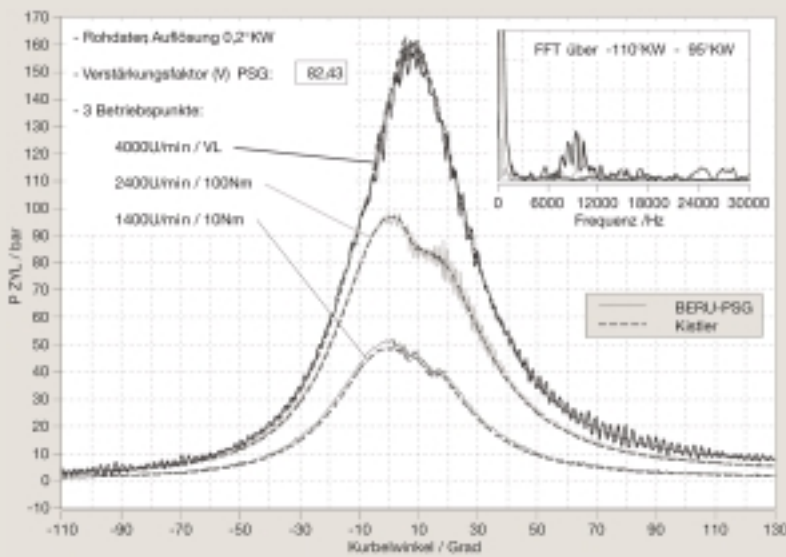


Bild 7: Brenraumdrucksignale (verschiedene Betriebspunkte, Fourier-Analyse)

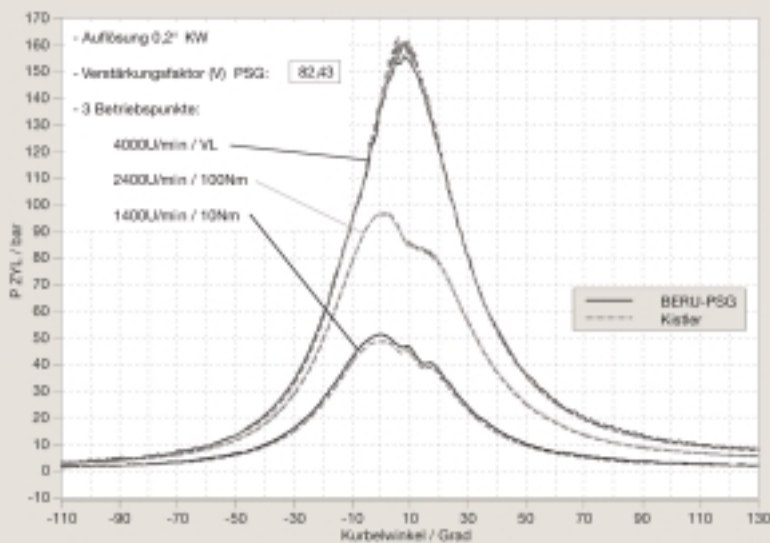


Bild 8: Brenraumdrucksignale (optimierte Eigenfrequenz)

In **Bild 8** ist ein typischer Signalverlauf der hinsichtlich ihrer Eigenfrequenz optimierten Beru-PSG im Vergleich mit dem Referenzsensor dargestellt.

7 Fertigung und Kalibrierung

Das Flexboard wird mit dem Stecker verlötet und nach der Faltung zu einer komplett vormontierten Sensor-Stecker-Baugruppe an die Fertigungslinie geliefert. Nach Fertigstellung der Pressure-Sensor-Glow-Plug wird das Bauteil geprüft und bei drei Temperaturen kalibriert. Die ermittelten exemplartypischen Daten werden anschließend in den ASIC geschrieben.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Darstellung der zukünftigen Emissionsgrenzwerte wird beim Dieselmotor an neuen Brennverfahren wie HCCI, HCLI, HPLI, DCCS geforscht, die, wie auch die Forderung nach deutlicher Einschränkung der Toleranzen bei emissionsrelevanten Bauteilen, eine Closed-Loop-Regelung erfordern. Die Beru AG hat verschiedene Verfahren untersucht, die aus dem Brennraum Signale zur Motorsteuerung liefern. Dabei hat sich die Zylinderdruckmessung als vorteilhaft erwiesen. Zusammen mit der Firma Texas Instruments Holland B.V. wird ein Brennraum-Drucksensor auf piezo-resistiver Basis entwickelt, der in eine Glühkerze integriert wird. Für die Anschlüsse wird ein Stecksystem adaptiert, das die Glüh- und Messfunktion unabhängig voneinander erlaubt. Erste Messungen mit A- und B-Mustern der Pressure Sensor Glow Plug (PSG) zeigen eine hohe Genauigkeit und Güte des Konzeptes.

Damit stellt die Beru AG eine innovative Glühkerze mit Brennraum-Drucksensor vor, die möglicherweise eine Schlüssel-funktion für die Erschließung weiterer Potenziale zur Emissionsreduktion des Dieselmotors darstellt und so ein hohes Maß an Zukunftssicherheit aufweist.

Die hier beschriebene Technik lässt sich überdies nicht nur mit den ISS-Stahlglühkerzen realisieren, sondern auch problemlos mit einem Beru-Keramik-Glühkerzenkonzept kombinieren.

Literaturhinweise

- [1] Moriwaki, J.; Murai, H.; Kameshima, A.: Glow Plug with Combustion Pressure Sensor. In: SAE Technical Paper Series 2003-01-0707
- [2] Sellnau, M. C. et al.: Cylinder-Pressure-Based Engine Control using Pressure-Ratio-Management and Low-Cost Non-Intrusive Cylinder Pressure Sensors. In: SAE Technical Paper Series 2000-01-0932
- [3] Glavmo, M.; Spadafora, P.; Bosch, R.: Closed Loop Start of Combustion Control Utilizing Ionization Sensing in a Diesel Engine
- [4] Mobley, C.: Non-Intrusive In-Cylinder Pressure Measurement of Internal Combustion Engines. In: SAE Technical Paper Series 1999-01-0544
- [5] Houben, H.; Uhl, G.; Schmitz, H.-G.; Endler, M.: Das elektronisch gesteuerte Glühsystem ISS für Dieselmotoren. In: MTZ (61) 2000, Nr. 10, S. 668-676



BERU Aktiengesellschaft
Mörikestrasse 155,
D-71636 Ludwigsburg
Postfach 229,
D-71602 Ludwigsburg
Telefon: ++49/7141/132-693
Telefax: ++49/7141/132-220
info@beru.de
www.beru.com