

Entwicklung eines hochtemperatur- und thermoschockfesten Drucksensors incl. intelligenter Signalverarbeitung zur Anwendung an die druckgeführte Motorregelung

Development of a hightemperature- and thermoresistant pressure sensor incl. intelligent signal condition unit for closed loop engine combustion control

Author: Stefan Neumann

Company: IMES GmbH

Abstract:

Based on analysis of increasing application requirements for cylinder pressure data acquisition, a system for combustion signal conditioning was developed for closed loop pressure applications on engines.

The signal condition unit detects the pressure signal of pressure sensors and calculates important values for online combustion control. The integrated software enables the user to easily adapt the analysis of the data to the needs of the application.

All calculated data can be connected to an engine control system via CAN bus. The system is a modular system up to 20 cylinder per engine.

Kurzfassung:

Um den gestiegenen Anforderungen in der Zylinderdrucksignalverarbeitung gerecht zu werden, wurden Zylinderdruckelektroniken entwickelt, die jede einzeln als Basiseinheit zur druckgeführten Motorregelung bei Motorherstellern zur Anwendung findet.

Die Zylinderdruckelektronik erfasst die Drucksignale von mehreren angeschlossenen Drucksensoren. Sie ermittelt hieraus Kenngrößen für die Motorregelung und Daten, die Aufschluss über den aktuellen Verbrennungszustand des Zylinders geben. Durch die integrierte Softwareschnittstelle kann die Auswertung vom Benutzer den jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden.

Alle berechneten und erfassten Daten sind via CAN Bus für Motorüberwachungs- und Sicherheitssysteme abrufbar. Die Systeme sind modular erweiterbar bis auf 20 Zylinder pro Motor.

Sensor

Ziel der Entwicklung war es einen Dünnschicht-Hochtemperatursensor mit unterschiedlichen Verarbeitungselektroniken zu entwickeln, die den kunden- und marktspezifischen Anforderungen entsprechen.

Hierzu waren folgende Eigenschaften der Messzelle für die Auswahl entscheidend:

1. Widerstandsfähig gegen starke Schwankungen der Medientemperatur (RT-1700°C).
2. Widerstandsfähig gegen Verbrennungsprodukte (Schwefel etc.).
3. Extrem Lastwechselfest (10^8 bis 10^9 Vollastwechsel).
4. Langzeitstabil bei Betriebstemperaturen mindestens bis 250 °C
5. Kleiner Thermoschockfehler des Drucksignals
6. Kleine Abmessungen.

Dünnschichttechnik

Das Dehnungsmeßstreifen (DMS) Verfahren nutzt die Veränderung der Widerstände in Brückenform (Abb.1). Die Messschicht besteht aus dem Material TION, welches sich durch extrem hohe Lastwechsel- und Temperaturbeständigkeit auszeichnet. Die TION-Schicht wird durch Sputtern in einem Argon-Stickstoff-/Sauerstoffgemisch hergestellt. Der Temperaturkoeffizient des Widerstands (TCR) ist für die thermodynamischen Eigenschaften des Dünnschichtsensors von wichtiger Bedeutung und lässt sich durch Variation des Argon-Stickstoff-/Sauerstoffgemisch einstellen.

Mit Hilfe der Dünnschichttechnik werden die Isolations- und Funktionsschichten auf der Membran in einem Sputterprozess aufgebracht (Abb. 2). Der Vorteil liegt darin das zwischen Messelement und Membran keine Medientrennung notwendig ist.

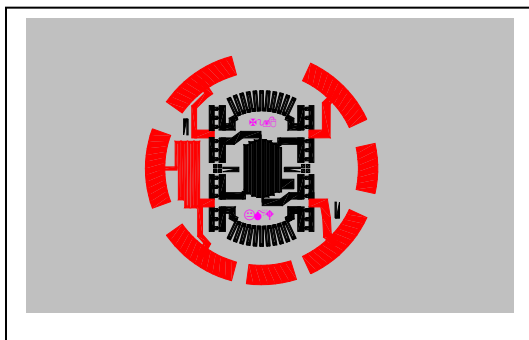


Abb.1: Dünnschichtstrukturen

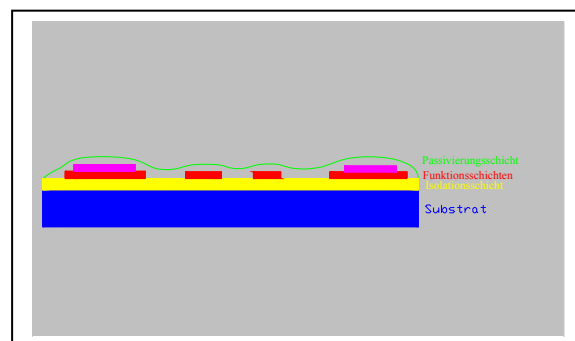


Abb.2: Funktions- und Isolationschichten

Langzeitstabilität

In einem Langzeittest an einem Otto-Gas-Motor wurden die Sensoren jeweils nach 5.000 bzw. nach 10.000 Betriebsstunden am IMES Kalibrierstand einer Überprüfung auf Spanne- und Offsetänderung unterzogen (Abb.3). Es ergaben sich geringe Änderungen der Spanne bzw. des Offsets nach 5.000 bzw. 10.000 Betriebsstunden. Zurzeit sind mehr als 1.000 Zylinderdrucksensoren mit über 10.000 h im Einsatz.

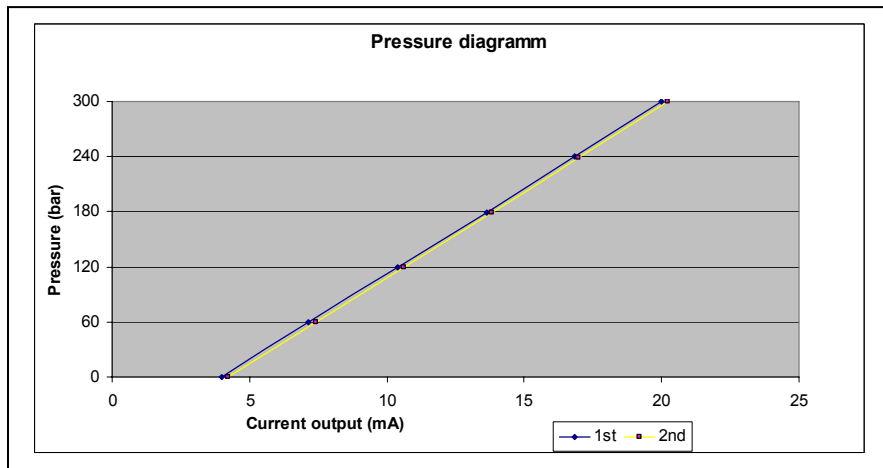


Abb.3: Spanne und Offsetverschiebung nach 5.000 h

Qualitative Vergleichsmessung

Motor: Otto-Gas (4-Takt)

Mitteldruck: 14 bar

Sensortyp: HTT-01JEV

Referenzsensor: Wassergekühlt piezoelektrisch

Brenn- verläufe:

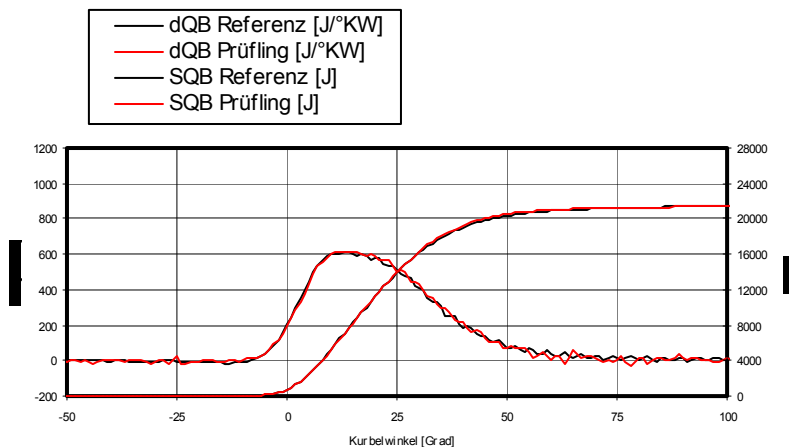


Abb.4: Brennverläufe imes HTT-01JEV Sensors gegenüber Referenz

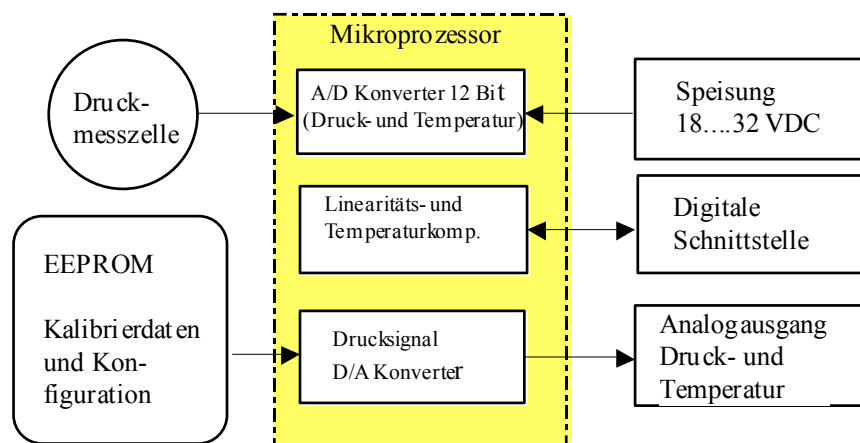
Anwendungskategorien der Zylinderdruckmessung

1. Digital temperaturkompensierter Zylinderdrucksensor mit Stromausgangssignal für Druck- und Temperatur.
2. Digital temperaturkompensierter Zylinderdrucksensor mit Stromausgangssignal für Klopfstärke und Druck.
3. Mehrkanalige Zylinderdruckelektronik mit Verarbeitungsprozessor.
4. Einzylinderelektronik mit Verarbeitungsprozessor.

Seitens der Motorenhersteller werden sehr unterschiedliche Anforderungen und Anwendungen an die Zylinderdruckmesstechnik gestellt. Permanente Messungen zur Druckregelung finden wir z.Zt. bei Gasmotoren. Hier werden Systeme zur Klopfkennung und zur Detektion des Fehlzündens eingesetzt. Aufgrund unterschiedlicher Einsatzfälle, werden Motoren je nach Einsatzfall und Kostengründen mit einem oder mehreren Zylinderdrucksensoren ausgestattet sind.

Unterschiedliche Applikationen erfordern in der Realisierung modulare und miteinander kompatible Komponenten. Im nachfolgenden werden einige Komponenten und deren Kompatibilität zueinander für die permanente Zylinderdruckanwendungen beschrieben.

Digital temperaturkompensierter Zylinderdrucksensor



Das Sensorsignal wird mit einem hochpräzisen A/D Wandler (12 bit) bis zu 15.000 mal pro Sekunde gemessen. Nach jeder Messung wird der exakte Druckwert berechnet (Eliminierung der Linearitäts- und Temperaturfehler). Das analoge Drucksignal wird über den D/A Wandler aktualisiert. Mit dieser Technologie ist es möglich, Drücke auch über große Temperaturbereiche hochpräzise und schnell zu messen.

Digitale Kompensationstechnik

Nichtlinearitäten und Temperaturabhängigkeiten des Drucksensors können mit mathematischer Modellierung des Sensors weitgehend eliminiert werden. Jeder Drucktransmitter wird in der Produktion über den ganzen Temperatur- und Druckbereich ausgemessen. Mit diesen Messdaten wird ein mathematisches Modell gebildet.

Im Betrieb wird mit folgender Formel der exakte, fehlerbereinigte Druckwert berechnet:

$$p = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{k=0}^m \text{coeff}_{i,k} * \text{temperature}^k \right) * \text{pressure}^i$$

p: Berechneter Druckwert

Temperature: Gemessene Temperatur am Sensorelement

Pressure: Gemessenes Drucksensorsignal

Coeff: Koeffizienten

n,m: Ordnung der Polynome. Wertebereich: 1...3



Abb.5: Digitale Sensorelektronik

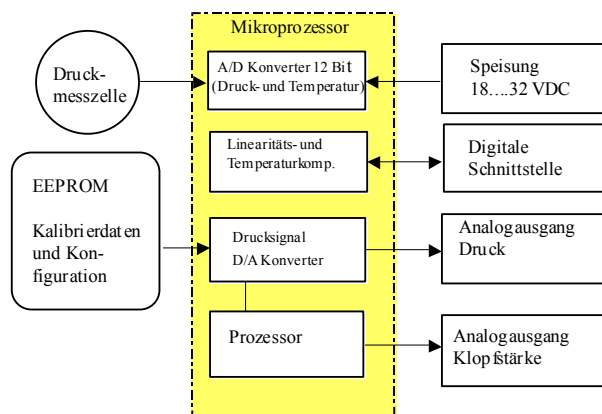
Digitales Interface

Zusätzlich zum Analogsignalausgang bietet die neue Generation des digitalen Zylinderdrucksensors noch eine serielle Schnittstelle. Diese bietet folgende Möglichkeiten:

- Auslesen der max. Druck- und Temperaturwerte
- Auslesen der Betriebsstunden
- Kundenseitige Kalibrierung des Nullpunktes und Verstärkung
- Konfigurationseinstellungen
- Auslesen von Seriennummer, kompensierte Druck- und Temperaturbereiche

Durch diese Kompensationstechnik reduziert sich das Fehlerband auf typisch < 1 %FS über den gesamten Temperatur- und Druckbereich. Zu jedem Zylinderdrucksensor wird ein Prüfprotokoll mitgeliefert bei mindestens 3 Temperaturstufen und mit je 7 Druckpunkten. Weiterhin kann die automatische Offsetkompensation wahlweise durch den Kunden oder werksseitig aktiviert oder deaktiviert werden.

Schneller digitaler temperaturkompensierter Zylinderdrucksensor mit Klopfstärkesignal



Dieses einfache System besteht aus einem Zylinderdrucksensor mit Klopfstärkesignal, einem portablen Handgerät und einem Notebook mit einem Visualisierungsprogramm zur Einstellung der Klopfstärkesignale in der Zylinderdruckelektronik (Abb.6). Zur permanenten Klopfüberwachung wird das Klopfstärkesignale (4...20 mA) direkt auf das jeweilige Automatisierungssystem geschaltet. Zu Diagnosezwecke kann der Service die Zylinderdruckkurven mit dem Handgerät und/oder einem angeschlossenen Notebook auswerten. Diese Anwendung findet vor allem bei kleinen BHKW's Anwendung wobei nur ein oder zwei Sensoren aus Kostengründen an das Automatisierungssystem angeschlossen sind.

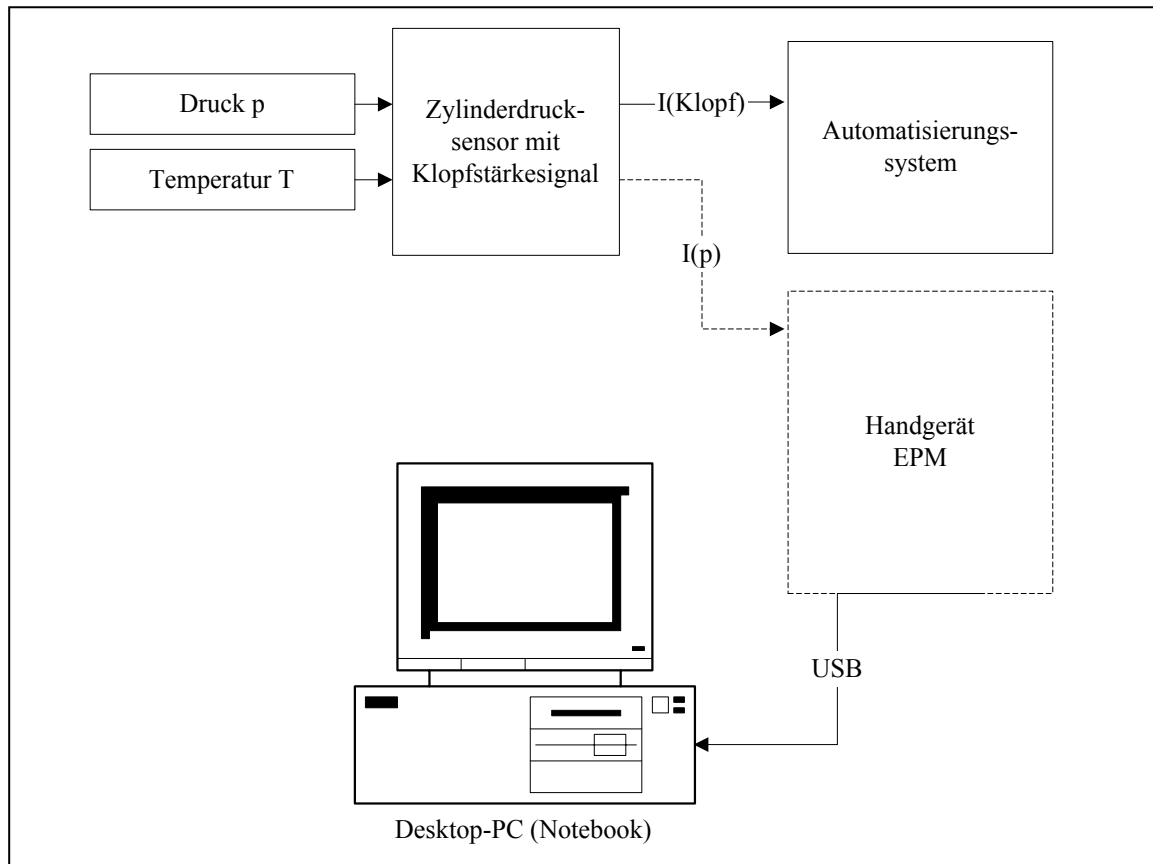


Abb.6: Zylinderdrucksensor mit Klopfstärkesignal an Automatisierungssystem

Mehrkanalige Zylinderdruckelektronik mit Verarbeitungsprozessor

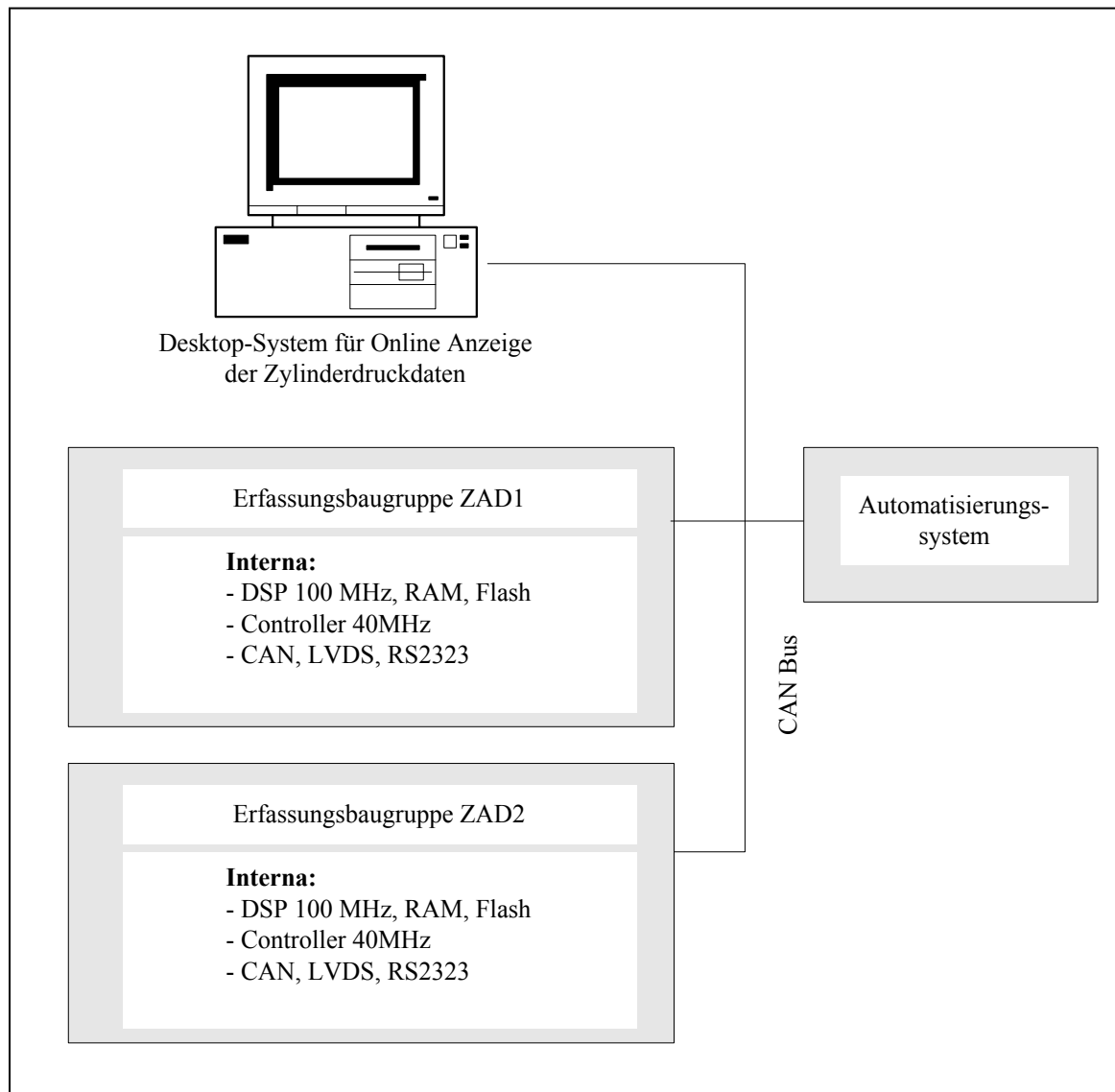


Abb.7: Mehrkanalige Systemanwendung

Ein komplettes Meßsystem für Online-Datenerfassung und -speicherung an einem Gasmotor besteht aus den Zylinderdrucksensoren, einem Pickup für den Drehzahlimpuls, einer ZAD-Baugruppe für die Digitalisierung und Signalauswertung und -überwachung. Mit einer ZAD Baugruppe kann der Anwender bis zu 10 Zylinderdrucksensoren anschließen. Für Motoren mit mehr als 10 Zylindern kann eine zweite ZAD Baugruppe modular aufgebaut werden. Die Kurbelwinkelauflösung im Dauerbetrieb beträgt $0,5^\circ$ KW pro Kanal.

Mit diesem System ist der Anwender in der Lage, Zylinderdruck- und Klopfüberwachung online auszuführen, Fehlzünden, und schwache Verbrennung zu detektieren. Die Datenübertragung erfolgt via CAN-Bus zum Automatisierungssystem.



Abb.8: Zwei ZAD-Baugruppen an einem 20 Zylinder Gasmotor

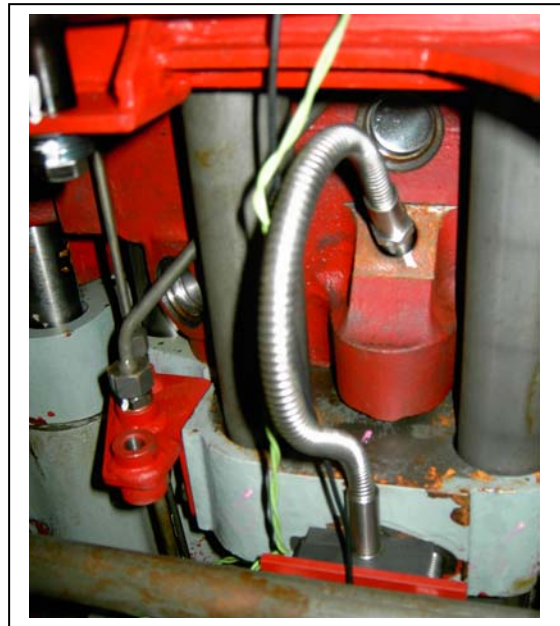


Abb.9: Einbauort eines IMES Zylinderdrucksensors an einem Gasmotor

Einzyliederelektronik mit Verarbeitungsprozessor.

Ein Beispiel für eine Ein-Zylinder-Elektronik ist das ZSX-Baugruppe, das direkt an die Messzelle angeschlossen wird und die Messwerte via CAN an andere Motorelektronik oder Visualisierungsgeräte übermitteln kann (Abb. 10 und 11).

Die Kurbelwinkelauflösung des ZSX Geräts beträgt bis zu $0,1^\circ$ KW .



Abb.10: ZSX Baugruppe

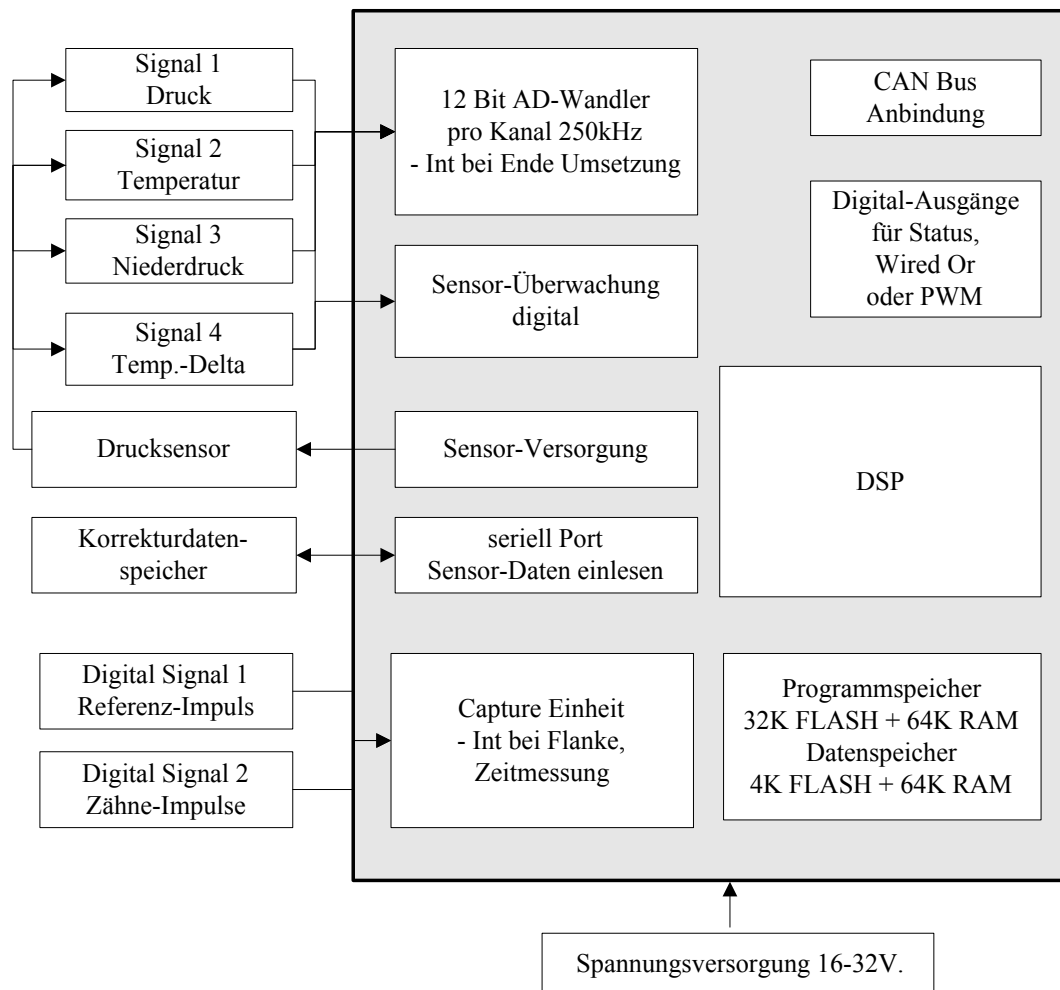


Abb.11 Einkanalige Systemanwendung ZSX

Systemanwendungen bei Gasmotoren

Das Arbeitsfenster von Gasmotoren (Abb.12) mit hohen Mitteldrücken > 18 bar mit gleichzeitig hohen Anforderungen gegenüber den Umweltschutzbestimmungen wird immer kleiner, so dass mit innovativer Sensorik und Auswertelektronik der Motor gegen Klopfen und Fehlzünden zu schützen ist. Gleichzeitig können die P_{max} Werte von allen Zylindern erfasst- und somit eine Gleichstellung aller Zylinder durchgeführt werden.

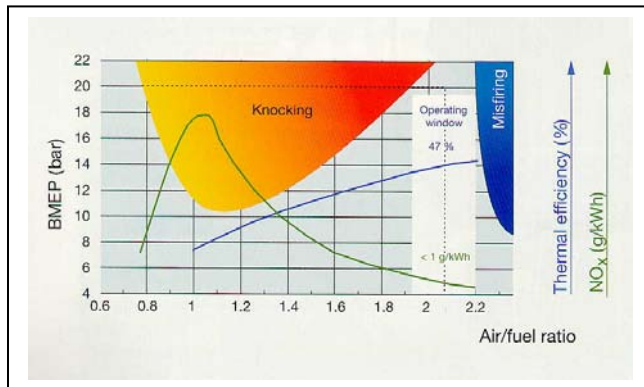


Abb.12: Beispiel Kennfeld eines Gasmotors

Will man für den Online-Betrieb Klopfkennungs-Algorithmen implementieren oder die spektrale Zusammensetzung des Zylinderdrucksignals ermitteln, so kommt man um den Einsatz digitaler Signalprozessoren nicht herum, weil diese Prozessoren in ihrem Befehlssatz zum einen die sog. MAC-Operation für die Berechnung einer linearen Gleichung enthalten und andererseits über Adressierungsmöglichkeiten verfügen, die eine effiziente Abarbeitung der FFT (Fast Fourier Transformation) gestatten. Die Auswirkungen diesbezüglicher Design-Entscheidungen ("the processor matters") am Beispiel der digitalen Filterung, wie sie in der Klopfkennung zum Einsatz kommt, erläutert:

Beispiel: Digitalfilter

Die Gleichung/Berechnungsvorschrift ist :

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) * x(n - k)$$

mit

$y(n)$ dem Filterausgang am Abtastzeitpunkt n

$h(k)$ dem k -ten Filterkoeffizienten

$x(n - k)$ dem Eingangswert zum Zeitpunkt $n-k$

N der Filterlänge

Die Implementierung auf einem Signalprozessor kostet $N + 14$ Zyklen , d.h. bei einer Taktfrequenz vom 50MHz dauert eine Filterung bei einer Filterlänge von 50 Werten

$$(50 + 14) * 2ns = 128ns$$

Für eine Klopfüberwachung filtert man beispielsweise 256 Werte um den oberen Totpunkt herum.
Dafür benötigt man dann

$$128ns * 256 = 32768ns = 32,768\mu s$$

Bei einem Viertakt-Motor mit 2000U/min dauert ein Arbeitsspiel 60ms, somit würde man für diese Berechnung 0,05% der Zeit eines Arbeitsspiels verbrauchen

Benutzt man dagegen einen General Purpose Controller wie zum Beispiel den C167 mit 40 MHz Taktfrequenz, so benötigt man für ein ähnliches Filter

$$104 * 50ns = 5200ns = 5,2\mu s \quad \text{für einen Filterschritt und}$$

$$5,2\mu s * 256 = 1331,2\mu s = 1,3312ms \quad \text{für 256 Werte.}$$

Das wären dann für o.g. Motor schon 2,2% eines Arbeitsspieles.

Um die vorher genannten technischen Bedingungen zu erfüllen wurde die vorher beschriebenen IMES Zylinderdruckerfassungsbaugeräte ZAD und ZSX entwickelt, welche die Drucksignale der angeschlossenen Zylinderdrucksensoren mit 0,5°KW erfasst und auswertet. Die berechneten Daten werden über CAN- Bus dem Automatisierungssystem und/oder dem Visualisierungs- PC zur Verfügung gestellt .

Die ZSX oder ZAD Geräte sind modular aufgebaut und führen folgende Funktionen durch:

- Erfassung und Berechnung der Drucksignale
- Erfassung des OT's und Nockenwellenimpuls als Referenzpunkt der Drucksignale
- Steuerung der Relais- Ausgänge
- Funktionsüberwachung der Drucksensoren
- Eigenüberwachungsfunktion
- Steuerung des 4-20mA Analogsignals

Die ZSX oder ZAD Geräte führen folgende Berechnungen innerhalb eines einzigen Motorzyklus durch:

- Klopfkennung
- Erkennung von Fehl- und Schwachzündungen
- Berechnung von Pmax
- Indizierter Mitteldruck

Knock / Misfire Parameter

Eine klopfende Verbrennung (Abb.12) erzeugt Änderungen im spektralanalytischen Aufbau und in der Energie des Zylinderdrucksignals. Die Analyse wird während jedes Arbeitszyklus mittels einer digitalen Entstörung und der Auswertung der Signalenergie im restlichen Frequenzspektrum durchgeführt. Der errechnete Wert für die Signalenergie wird Klopffzahl (Abb.13) genannt. Die Klopffzahl wird über CAN- Bus übermittelt, sobald das Arbeitsspiel beendet ist.

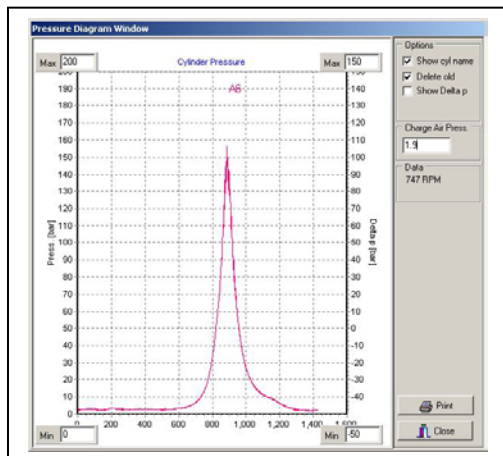


Abb.12: Klopfende Verbrennung

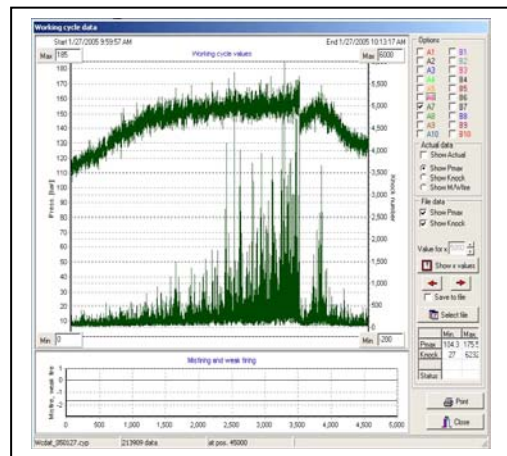


Abb.13: Online Darstellung der Klopffzahl

Das Fehl- und Schwachzünden wird ermittelt, indem man symmetrisch die Unterschiede der Druckwerte um OT innerhalb eines vorbestimmten Fensters auswertet. Diese Funktion wird in Echtzeit bei jedem Arbeitsspiel durchgeführt. Wenn Fehlzündungen erkannt, wird es umgehend über CAN- Bus übermittelt, sobald das Arbeitsspiel beendet ist.

Zusammenfassung

Es wurde ein extrem lastwechselfester Zylinderdrucksensor für Dauereinsatztemperaturen bis 300 °C entwickelt. Z. Zt. sind mehr als 3.000 Zylinderdrucksensoren im Dauereinsatz. 1.000 Sensoren haben bereits mehr als 10.000 Betriebsstunden.

Mit Hilfe der modular aufgebauten Zylinderdruckelektroniken können zukünftige Überwachungs- bzw. Motorregelungskonzepte realisiert werden. Kenngrößen für die Motorregelung werden in Echtzeit berechnet werden und das angeschlossene Automatisierungssystem übermittelt.

Literatur

Ifeachor, E.C.; Jervis, B.W.: Digital Signal Processing - A Practical Approach; Addison Wesley; 1993
Rolf Kuratle; Motorenmesstechnik