

Schlussbericht

zum Förderprojekt:

**„Thermoschockfeste Hochtemperaturdrucksensoren für die
Zylinderdruckregelung in Verbrennungsmotoren“**

Förderprogramm:

Mikrosystemtechnik 2000+

Förderkennzeichen:

16 SV 1461

Sensor-Technik Wiedemann GmbH

Am Bärenwald 6

87600 Kaufbeuren

Projektleiter: Dr. Rolf Jung



GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Forderkennzeichen 16SV1461/0 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung tragen die Autoren.

Autoren:

Dr. Rolf Jung, Sensor-Technik Wiedemann GmbH 87600 Kaufbeuren

Dr. Ralf Ehret-Nießen, Partner für Innovation & Förderung, 77933 Lahr

Inhalt

	Seite
1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	9
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	11
4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte	11
4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	12
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
6. Erzielte Ergebnisse	14
7. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen	26
8. Während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte	29
9. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	30

1. Aufgabenstellung

Die Regelung von Groß-Verbrennungsmotoren, wie z.B. Schiffsantriebe, stationäre Dieselaggregate für Blockheizkraftwerke oder Notstromanlagen, usw., erfolgt konventionell über die Motordrehzahl. Bei dieser rein drehzahlabhängigen Motorregelung werden für die Verbrennung und den Wirkungsgrad der Motoren wesentliche Kriterien, wie z.B. Qualität und Zusammensetzung des Brennstoffs, individuelle Toleranzen zwischen den Zylindern, usw., nicht berücksichtigt. Bei vorzeitiger oder verspäteter Zündung bzw. Verbrennung des Kraftstoffgemisches neigen Motoren daher zum "Klopfen" und dadurch bedingt zu verstärktem Verschleiß und Schadstoffemissionen. Weiter wird durch die unvollständige Verbrennung des Kraftstoffs die Leistung der Aggregate erheblich reduziert.

Ziel des TSCHOCK-Projektes war die Entwicklung und der mikrotechnische Aufbau eines neuartigen, Thermoschock-resistenten Hochtemperatur Drucksensorsystems für die dynamische Erfassung des Zylinderdrucks direkt im Brennraum von Groß-Verbrennungsmotoren. Dazu sollte im Projekt ein Drucksensorsystem entwickelt und aufgebaut werden, das direkt in die Zylinderinnenwand des Brennraums integriert werden kann. Weiter geplant war die Entwicklung und Integration einer hochtemperaturfesten Signalvorverarbeitungselektronik in das Thermoschock-resistente Drucksensorsystem.

Die mit Hilfe des Hochtemperatur Drucksensorsystems online aus dem Motorbrennraum ermittelten Druckmesswerte sollten zur Vorausberechnung des optimalen Zündzeitpunktes individuell für jeden Zylinder von der Motorsteuerung genutzt

werden können. Bedingt durch den geplanten Einsatz im Brennraum sollte der geplante Thermoschock-resistente Hochtemperatur Drucksensor extremen Anforderungen genügen, die zum Teil nur durch die Entwicklung bzw. den Einsatz von neuen mikrotechnischen Lösungen erfüllt werden können:

1. Hochtemperaturfestigkeit: Durch den Verbrennungsprozess wird das in die Zylinderwand bzw. in den Zylinderkopf integrierte Drucksensorsystem Temperaturen bis 250 °C ausgesetzt. Bei Fehlfunktionen, wie z. B. "Klopfen", können auf der Membrane des Sensorelementes Temperaturspitzen > 400 °C auftreten.

Aufgabe im Projekt war die Entwicklung eines Drucksensorsystems, das unter extremen Umgebungsbedingungen mit einer Lebensdauer > 15.000 Stunden eingesetzt werden kann. Hierbei sollte trotz der extrem hohen thermischen Belastungen mit Temperaturspitzen > 400 °C auf die zum Zeitpunkt der Antragstellung bei Zylinderdrucksensoren übliche aktive Kühlung des Drucksensorsystems verzichtet werden.

2. Thermoschock-resistenz: Durch die explosionsartige Verbrennung entstehen im Brennraum kurzfristig extrem hohe Temperaturgradienten von $\Delta T > 1.600$ °C unmittelbar vor der Sensormembrane. Durch diesen Temperatursprung wird die Membrane des Drucksensorelementes kurzzeitig extremen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Dieser als Thermoschock bezeichnete Effekt verursacht bei der für die Regelung von Motoren notwendigen Leistungsberechnung inakzeptable Fehler > 10 %. In der folgenden Abb. 1 wird die Wirkung des Thermoschock-induzierten Messfehlers auf die Messung des Spitzendrucks und die Leistungsberechnung dargestellt.

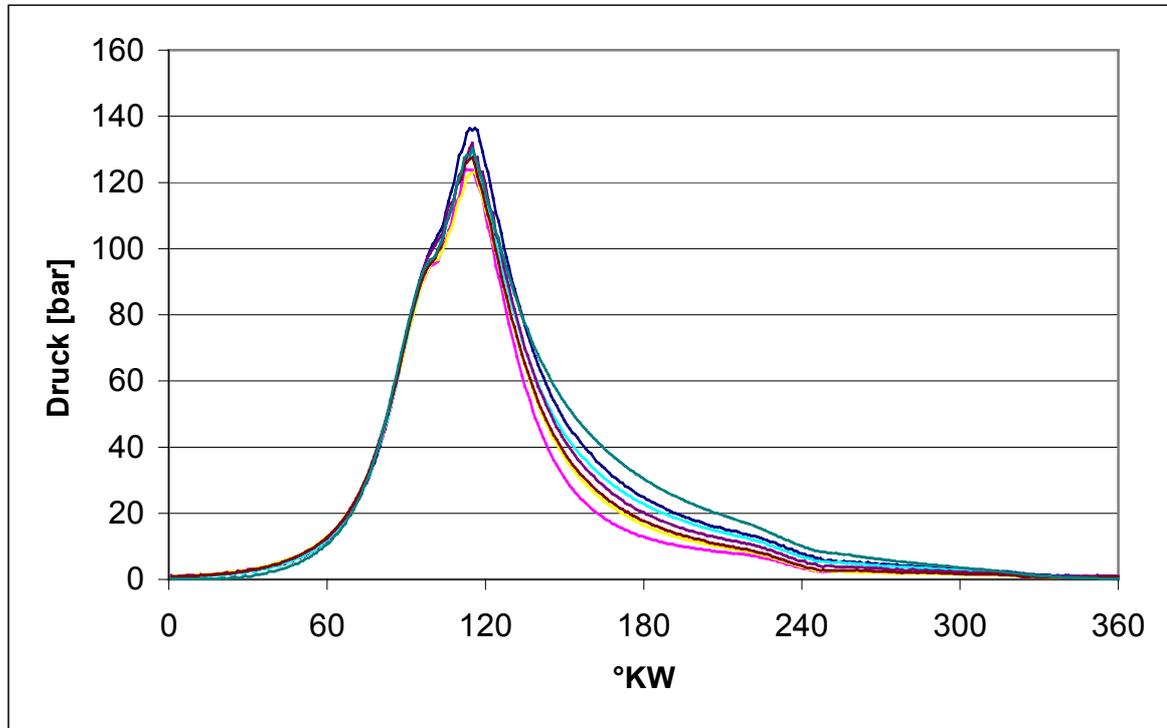


Abb. 1: Thermoschock-induzierter Fehler bei Druckmessung und Leistungsberechnung

Aufgabe im TSCHOCK-Projekt war die Entwicklung und Realisierung eines Thermoschock-resistenten Drucksensorsystems, das bei den im Verbrennungsraum gegebenen, extremen Umgebungsbedingungen einen Thermoschock-induzierten Messfehler $< 0,5\%$ aufweist.

3. Betriebsfestigkeit: In Verbrennungsmotoren herrschen mit Zylinderwandtemperaturen $> 400\text{ °C}$, Temperatursprüngen von $\Delta T > 1.600\text{ °C}$, starken Vibrationen sowie schwefelhaltiger Umgebung und Rußablagerungen extreme Umgebungsbedingungen.

Aufgabe im Projekt war die Realisierung von Thermoschock-resistenten Zylinderdrucksensoren, mit denen bei den dargestellten extremen Umgebungsbedingungen Standzeiten > 15.000 Betriebsstunden realisiert werden können.

4. Integration Signalvorverarbeitung: Zur Vermeidung von Störungen bzw. Sensorausfall, bedingt durch die extremen thermischen, mechanischen und EMV-Bedingungen im Umfeld von Großmotoren sollte im Projekt eine Signalvorverarbeitung für Signalverstärkung, Signalfilterung sowie Überspannungs- und Verpolungsschutz entwickelt und in das Sensorsystem integriert werden.
5. Sensor-Selbsttestfunktionen: Zur Sicherstellung der Sensorfunktion für die angestrebte Standzeit von > 15.000 Stunden bei den dargestellten extremen Umgebungsbedingungen sollten im Projekt Selbsttestfunktionen entwickelt und in den Sensor integriert werden.

Im Rahmen des Mikrosystemtechnik-Projektes TSCHOCK bestand die Aufgabe der Sensor-Technik Wiedemann GmbH in der Entwicklung und dem mikrotechnischen Aufbau eines Thermoschock-resistenten Sensorelementes für die Langzeitmessung von Zylinderdrücken direkt im Brennraum von Groß-Verbrennungsmotoren. Weitere Schwerpunkte der bei Sensor-Technik Wiedemann durchgeführten Arbeiten bestanden in der Integration des Sensorelementes und dem Aufbau eines Hochtemperatur Zylinderdruck-Sensorsystems sowie in der Entwicklung der Hardware für die Erfassung und Auswertung der Sensorsignale.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Sensor-Technik Wiedemann entwickelte, produzierte und vertrieb zu Projektstart jährlich mehr als 10.000 komplexe Steuerungs- und Regelgeräte sowie CAN-BUS-Module für Anwendungen in der Automotiv-, Bau- und Agrarmaschinenindustrie.

Ein weiteres Standbein der Sensor-Technik Wiedemann GmbH ist die Entwicklung und Produktion von Drucksensorelementen in Dünnschichttechnologie inklusive der für die Signalverarbeitung erforderlichen Hard- und Software. Für die Entwicklung und Produktion von Dünnschicht-Drucksensorelementen stand zu Projektstart beim ebenfalls am Standort Kaufbeuren angesiedelten, verbundenen Unternehmen KMW GmbH eine vollständig ausgestattete Dünnschicht-Linie zur Verfügung. Mit den vorhandenen Anlagen konnten Dünnschichtsysteme aus einfachen Metallschichten (z. B. Au, Al, Ni, Cr, Ti), Metalllegierungen (z. B. NiCr oder TiON) sowie isolierende keramische Schichten (z. B. Al₂O₃, SiO₂) auf unterschiedlichen Trägersubstraten aufgebracht und bearbeitet werden.

Im Einzelnen standen die folgenden Anlagen für die Beschichtung und Mikrostrukturierung von Oberflächen und Substraten während der Projektlaufzeit zur Verfügung:

- Reinraum mit Fotolithographie- und Chemiearbeitsplätzen
- drei komplett eingerichtete Sputteranlagen sowie eine CVD-Anlage
- Ionenstrahl-Ätz- und RIE-Ätzanlagen
- im Bereich AVT: Löt-, Bond-, Schweiß- und Hartlöteinrichtungen

Im Jahr 2001 wurden bei der KMW GmbH mehr als 20.000 Sensorelemente in Dünnschichttechnologie hergestellt. Zu Projektende im Jahr 2004 wurde ein neuer Reinraum mit deutlich erweiterten Entwicklungs- und Produktionskapazitäten bei der KMW GmbH fertiggestellt. Damit stehen zukünftig ideale Rahmenbedingungen für die Fertigung der im Projekt entwickelten Thermoschock-resistenten Hochtemperatur-Drucksensorelemente mit hoher Qualität und Reproduzierbarkeit zur Verfügung.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung zu Beginn des TSCHOCK-Projektes sah 3 verschiedene Phasen vor:

1. Voruntersuchungen und Evaluierung: In Vorversuchen sollten für den Einsatz in Diesel- und Gasgroßmotoren relevante thermische, mechanische und Umgebungsparameter ermittelt sowie Werkstoffe und Dimensionen für die Realisierung des Sensorsystems untersucht und ausgewählt werden. Weiter waren Untersuchungen zur Ermittlung von Anforderungen an Aufbau- und Verbindungstechniken sowie zur Realisierung der angestrebten Thermoschock- und Temperaturfestigkeit von Dünnschichten bzw. Dünnschichtsystemen vorgesehen.
2. Entwicklung: Schwerpunkt von Phase 2 war die Entwicklung von Thermoschock-resistenten Funktions- und Passivierungsschichten sowie von Aufbau und Verbindungstechniken für die Realisierung des Hochtemperatur-Zylinderdruck-Sensorsystems. Weiter waren die Entwicklung und Integration der Signalverarbeitungselektronik sowie die Miniaturisierung des Zylinderdrucksensors vorgesehen. Die Entwicklung von neuen bzw. optimierten aktiven und passiven Dünnschichtsystemen war in enger Zusammenarbeit mit dem Auftragnehmer KMW GmbH geplant. Die Arbeiten zur Entwicklung von Funktionsschichten sowie zur Konstruktion des Druckensorelementes sollten durch gemeinsam mit dem Partner TU Hamburg-Harburg durchgeführte FEM-Berechnungen unterstützt werden.

3. Test und Optimierung: Phase 3 des Projektes sah den Aufbau von Versuchsmustern und Prototypen für Thermoschock-resistente Zylinderdrucksensoren sowie der erforderlichen Signalverarbeitungselektronik vor. Weiter war die Durchführung von Labor- und Felduntersuchungen in Zusammenarbeit mit dem Partner IMES GmbH und Herstellern von Großmotoren geplant. Die Ergebnisse aus Labor- und Feldversuchen sollten die notwendigen Grundlagen und Informationen für die Optimierung der Sensorelemente und Dünnschichttechnologie, der Signalvor- und Signalverarbeitung, sowie der Aufbau und Verbindungstechniken liefern.

Rückblickend kann festgestellt werden, dass die Entwicklungsarbeiten im Wesentlichen planmäßig verliefen. Aufgrund der extremen Einsatzbedingungen sowie der anspruchsvollen Zielstellung bezüglich Einsatztemperatur, Lebensdauer und Messgenauigkeit für das geplante Zylinderdrucksensorsystem waren im Projekt jedoch erheblich mehr Redesignzyklen als ursprünglich geplant erforderlich. Vor allem die Lösung von aufbau- und verbindungs-, dünnschicht- und korrosionstechnischen Problemstellungen erforderte erheblich höheren Zeit- und Kostenaufwand als ursprünglich im Antrag geplant.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Für Zylinderdruckmessungen in Verbrennungsmotoren wurden zum Zeitpunkt der Antragstellung vorwiegend wassergekühlte, piezoelektrische Drucksensoren eingesetzt. Diese Sensorbauform zeichnet sich vor allem durch eine hohe Messgenauigkeit aus. Unabhängig von den geringen Messfehlern besitzen piezoelektrische Drucksensoren jedoch vor allem für den Praxiseinsatz in Verbrennungsmotoren erhebliche Nachteile.

Ein wesentlicher Nachteil von piezoelektrischen Drucksensoren besteht in der niedrigen Lastwechselfestigkeit. Mit den bei Projektstart verfügbaren Drucksensoren konnten maximal 10 Mio. Lastspiele, dies entspricht bei 170 U/min. einer Betriebsdauer von ca. 1.000 Stunden, gemessen werden. Für die Realisierung der hohen Messgenauigkeit ist eine zusätzliche Wasserkühlung des piezoelektrischen Sensors notwendig. Die zusätzliche Wasserkühlung erfordert im Gegensatz zu ungekühlten Sensoren einen hohen Installations- und Betriebsaufwand. Weiter können mit piezoelektrischen Drucksensoren üblicherweise nur dynamische Druckverläufe erfasst werden. Die Messung von statischen Drücken ist nur mit zusätzlichem Aufwand möglich.

Aufgrund der dargestellten Nachteile ist der Einsatz von piezoelektrischen Zylinderdrucksensoren vorwiegend auf das Prüffeld von Verbrennungsmotoren beschränkt. Piezoelektrische Sensoren für das Prüffeld wurden zu Projektstart vor allem von den Firmen Kistler (Schweiz) und AVL (Österreich) auf dem Markt angeboten.

Bei Sensor-Technik Wiedemann wurden im Jahr 2001 erstmals Testmuster für Dünnschicht-Drucksensoren für Einsatztemperaturen von 250 °C und Temperatur-Spitzenbelastungen bis 300 °C entwickelt. Mit diesen Hochtemperatur-Drucksensoren konnten bereits Standzeiten von bis zu 3.000 Betriebsstunden realisiert werden. Geringfügig höhere Temperaturen führten jedoch bereits nach kurzer Zeit zur Zerstörung des Sensorsystems.

Das bei der Entwicklung dieser in Dünnschichttechnik aufgebauten Hochtemperatur-Druckmesszelle gesammelte Know-how bildete eine wichtige Basis für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Realisierung des Thermoschock-resistenten Hochtemperatur Zylinderdruck-Sensorsystems.

Für die Entwicklung und den Aufbau von Thermoschock-resistenten Zylinderdruck-Messzellen wurde im TSCHOCK-Projekt ein Patent des verbundenen Unternehmens KMW GmbH genutzt.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Für die im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes erforderlichen Recherchen, insbesondere zum mikrotechnischen Aufbau von Sensoren, zu Dünnschichtsystemen und -verfahren sowie zur Zylinderdruckmessung in Großmotoren wurden vor allem Fachartikel herangezogen. Eine weitere wichtige Informationsquelle zu den genannten Themenstellungen bildeten Gespräche mit qualifizierten Mitarbeitern von Groß-Verbrennungsmotorenherstellern sowie von nationalen und internationalen, auf dem Gebiet der Zylinderdruckmessung führenden Instituten.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Lösung von technischen Problemstellungen sowie zur Durchführung von Labor- und Feldversuchen arbeitete Sensor-Technik Wiedemann sehr intensiv mit nationalen und internationalen Industrie- und Institutspartnern zusammen.

Projektintern erfolgte eine sehr enge Kooperation mit dem Partner TU Hamburg-Harburg zur Entwicklung von neuen Isolations-, Passivierungs- und Korrosionshemmenden Dünnschichten bzw. Dünnschichtsystemen. Einen weiteren Schwerpunkt der Kooperation mit der TU Hamburg-Harburg bildete die Entwicklung eines Softwaresystems für die Simulation der durch den Verbrennungs- und Thermochock-Effekt in die Membrane des Drucksensor-Elementes induzierten thermischen und mechanischen Belastungen.

Einen wichtigen Beitrag zur Lösung der mit dem Mikrosystemtechnik-Projekt TSCHOCK verbundenen Aufgabenstellung leistete das mit der Sensor-Technik Wiedemann GmbH verbundene Unternehmen KMW GmbH. Die KMW GmbH trug maßgeblich zur Entwicklung der Thermochock-resistenten Zylinderdruck-Messzelle sowie zur Optimierung der chemischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften von aktiven und passiven Dünnschichten bzw. Dünnschichtsystemen bei. Eine weitere Aufgabe der KMW GmbH bestand in der Herstellung von Testmustern für die Thermochock-resistente Hochtemperatur-Zylinderdruckmesszelle.

Weiter arbeitete Sensor-Technik Wiedemann bei der Durchführung von Labor und Feldversuchen eng mit Motorenherstellern sowie im Bereich Verbrennungsmotoren mit etablierten Instituten, wie z. B. der Universität Graz, zusammen.

6. Erzielte Ergebnisse

Die im Forschungs- und Entwicklungsprojekt TSCHOCK bei Sensor-Technik Wiedemann erarbeiteten technischen und wissenschaftlichen Ergebnisse werden nachfolgend zusammengefasst dargestellt.

In enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner TU Hamburg-Harburg wurden die Grundlagen für die Realisierung eines Softwaresystems zur FEM-Simulation der mechanischen und thermischen Zustände und Veränderungen in der Druckmesszellen-Membrane während des Verbrennungsvorganges erarbeitet. Der Partner TU Hamburg-Harburg entwickelte die numerische Grundlage und programmierte das Simulationssystem zur Durchführung von FEM-Berechnungen. Parallel wurden bei Sensor-Technik Wiedemann Untersuchungen zur Definition und Spezifikation der Anforderungen sowie umfangreiche Versuchsreihen zur Ermittlung von Randwerten und Startparametern durchgeführt. Nach mehreren Redesign-Zyklen wurde das FEM-Softwaresystem so weit optimiert, dass durch den Verbrennungsprozess in die Sensormembrane induzierte thermische und mechanische Einflüsse numerisch abgebildet werden konnten. In Abb. 2 wird beispielhaft das Ergebnis einer Simulationsrechnung der Temperaturverteilung im Bereich der Sensormembrane im Verbrennungsprozess gezeigt.

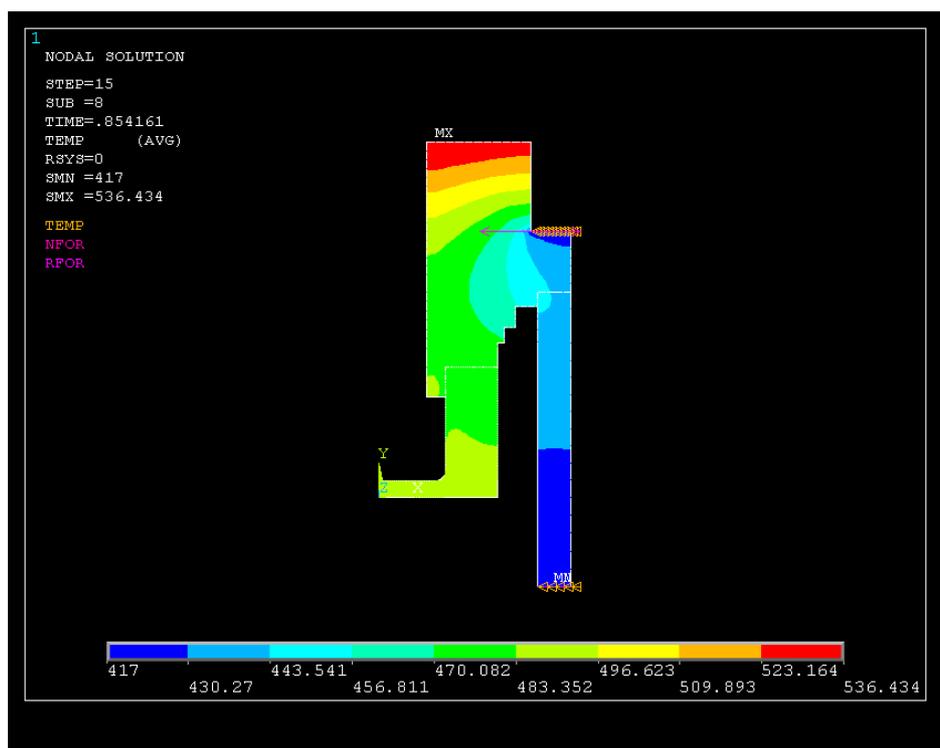


Abb. 2: Simulation der Temperaturverteilung im Bereich der Sensormembrane

Auf Grundlage der Ergebnisse aus Simulationsrechnungen wurde sowohl die Geometrie und Anordnung der DMS-Strukturen wie auch die aktiven und passiven Dünnschichtsysteme zur Reduzierung der Thermoschockempfindlichkeit der Zylinderdruck-Messzelle in mehreren Redesign-Zyklen optimiert. Die Übertragung der aus numerischen Simulationsrechnungen und Praxistests abgeleiteten Modifikationen auf Prototypen für Zylinderdruck-Messzellen wurde im Projekt durch den Bau neuer Reinräume und die Installation von neuen Anlagen bei der KMW GmbH unterbrochen. Nach Wiederaufnahme der Produktion in den neuen Reinräumen der KMW GmbH wird die neue Thermoschock-reduzierte Sensorgeneration für Zylinderdruckmessungen ca. Mitte 2005 zur Verfügung stehen. Der Schichtaufbau der im Rahmen des Projektes entwickelten Thermoschock-resistenten Zylinderdruck-Messzelle wird schematisch in der folgenden Abb. 3 gezeigt.

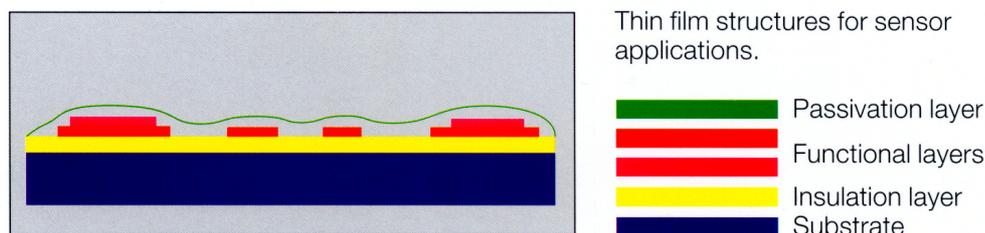


Abb. 3: Schematische Darstellung der aktiven und passiven Dünnschichten für die Thermoschock-resistente Zylinderdruck-Messzelle

Einen weiteren Schwerpunkt bildeten Entwicklungsarbeiten zur Minimierung des Thermoschock-Effektes durch die konstruktive Optimierung des Messzellenaufbaus. In umfangreichen Versuchsreihen wurden die relevanten Parameter von Druckmesszellen untersucht und konstruktive Strategien identifiziert und optimiert. Hierbei zeigte sich, dass neben der Wandstärke der Sensormembrane vor allem der Temperaturkoeffizient des Brückenwiderstandes (TCR-Wert) entscheidenden Einfluss auf die Thermoschockempfindlichkeit der Druckmesszelle hat. In der folgenden Abb. 4 wird der Thermoschock-Effekt in Abhängigkeit vom TCR-Wert dargestellt. Die Kurve "Z" stellt den Druckverlauf als Zylinderdruckkurve über dem Kurbelwellenwinkel in der rechten Diagrammachse dar. Die drei mit unterschiedlichen TCR-Werten gekennzeichneten Kurven zeigen Differenzsignale von Testsensoren bezogen auf einen Referenzsensor. Für diese drei Kurven gilt die linke Diagrammachse.

Ein wesentliches Ergebnis des Projektes besteht in der Erkenntnis, dass der Thermoschock-Effekt durch Optimierung des TCR-Wertes reduziert werden kann. Als Ergebnis von umfangreichen Testreihen wurde ein minimaler Thermoschock-Effekt für den Bereich $-50 \text{ ppm/K} \leq \text{TCR}_{\text{ideal}} \leq -10 \text{ ppm/K}$ ermittelt. Dieses Ergebnis

konnte mittlerweile durch FEM-Berechnungen bestätigt werden. Die theoretischen und praktischen Untersuchungen zur Minimierung des Thermoschock-Effektes durch Optimierung des TCR-Wertes werden auch nach Abschluss des TSCHOCK-Projektes weitergeführt.

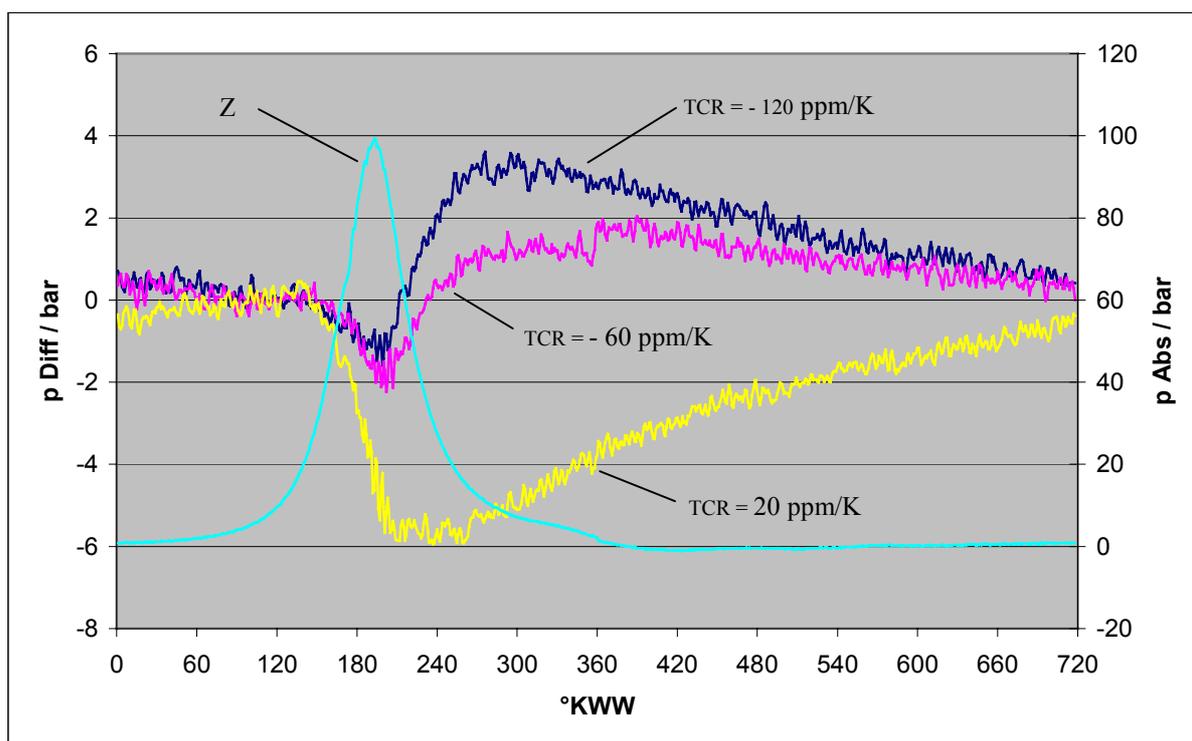


Abb.4: Abhängigkeit des Thermoschock-Effektes vom TCR-Wert

Im Projekt wurden weiter Untersuchungen zum Einfluss der Eigenfrequenz der Zylinderdruckmesszelle auf das Druck-Messergebnis durchgeführt. In Abb. 5 wird der in Praxisversuchen ermittelte Frequenzgang der Messzelle dargestellt.

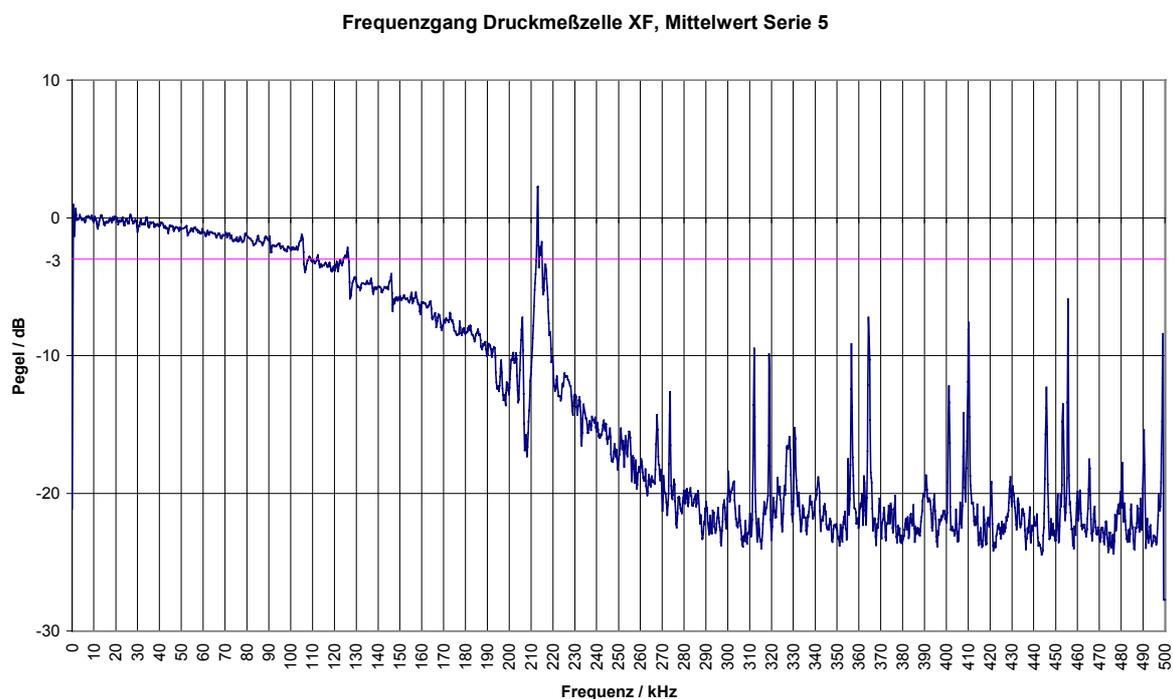


Abb.5: Frequenzgang der Zylinderdruck-Messzelle

Die Untersuchungen zur Ermittlung der Eigenfrequenz zeigen, dass die Resonanzfrequenz der Druckmesszelle bei ca. 210 kHz liegt. Da das Messintervall der Druckmesszelle maximal 10 kHz beträgt, ist ein ausreichend großer Abstand zwischen der gemessenen Frequenz und der Resonanzfrequenz der Druckmesszelle vorhanden.

Einen weiteren Schwerpunkt des Projektes bildete die Entwicklung von geeigneten Aufbau- und Verbindungstechniken zur langzeitstabilen Montage der mikrotechnisch aufgebauten Druckmesszellen. Insbesondere die von Großmotoren erzeugten Vibrationen führen häufig bereits nach wenigen Lastwechseln zu Rissen bzw. zur Zerstörung der aus Keramik gefertigten Montageringe für die Aufnahme der Druckmesszellen bzw. zum Bruch der Bond-Verbindungen. Im Projekt wurden ring- und sternförmige Geometrien für Keramikringe zur Aufnahme von Druckmesszellen

untersucht. Als besonders stabil erwies sich eine ringförmige Geometrie für die Keramikhalterung. Die ebenfalls im Projekt entwickelten sternförmigen Keramikhalterungen waren gegenüber Vibrationsbelastung wesentlich anfälliger, bieten jedoch speziell bei der Miniaturisierung des Sensorsystems, d.h. bei kleinem Einbauraum, erhebliche Vorteile gegenüber den ringförmigen Halterungen. In Abb. 6 wird die in einer ringförmigen Keramikhalterung montierte thermoschock-resistente Zylinderdruck-Messzelle gezeigt.

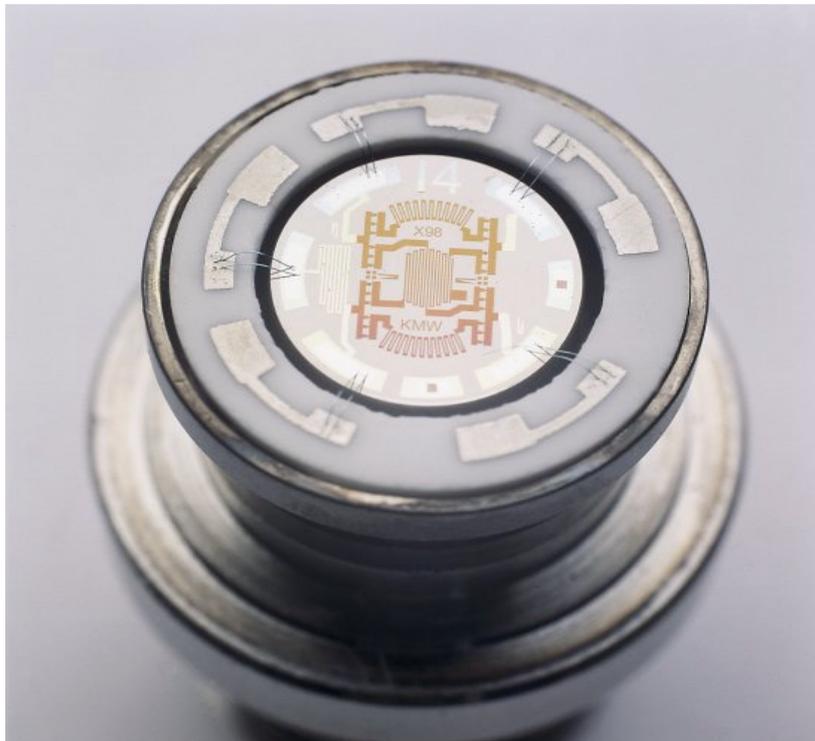


Abb. 6: Dünnschicht-Zylinderdruckmesszelle in Keramikring-Halterung

Ebenfalls im Projekt untersucht wurden Verfahren und Technologien für die elektrische Kontaktierung der Druckmesszelle. Die Versuchsreihen zeigten, dass sowohl Bond- wie auch Lötverbindungen speziell bei starken Vibrationen ähnliche Standzeiten erreichen.

Weiter zeigten theoretische Untersuchungen, dass durch die frontbündige Montage der Zylinderdruck-Messzelle in der Brennraumwand Effekte wie Totzeiten, Pfeifenschwingen und Schmutzablagerungen eliminiert und damit ideale Voraussetzungen für die Messung des Zylinderdrucks erreicht werden. Dagegen kann bei indirekter Messung, d.h. bei Ankopplung der Zylinderdruck-Messzelle an den Motorbrennraum über einen Messkanal, die thermische und mechanische Belastung der Membrane drastisch reduziert und damit die Standzeit der Druckmesszelle erhöht werden. Für den geplanten Serieneinsatz wird voraussichtlich ein Kompromiss zwischen Messgenauigkeit und Standzeit erforderlich sein.

Eine Studie zeigte weiter, dass die Thermoschock-Empfindlichkeit von Zylinderdrucksensoren von der Drehzahl des Motors abhängt.

Ebenfalls einen Schwerpunkt im Projekt bildete die Kalibrierung der Zylinderdruck-Messzellen bzw. -sensoren. Erste provisorisch in einem Klimaschrank durchgeführte statische Kalibrierungen lieferten unbefriedigende Ergebnisse. Eine wesentlich präzisere Kalibrierung konnte durch die Entwicklung und den Aufbau eines speziell an die Anforderungen der Thermoschock-resistenten Hochtemperatur Zylinderdrucksensoren angepassten statischen Kalibrierstandes beim Partner IMES realisiert werden. Durch Optimierung der Signalvorverarbeitungselektronik im Hause Sensor-Technik Wiedemann wurde die Präzision der Kalibrierung nochmals verbessert.

Aufbauend auf den beim Partner IMES GmbH bei der Konstruktion und Optimierung des statischen Prüfstandes erarbeiteten Erfahrungen sowie mit der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in Berlin geführten, intensiven Gesprächen, wurden im Projektjahr 2004 die Entwicklungsarbeiten zum Aufbau eines dynamischen Drucksensor-Prüfstandes für die Untersuchung des Thermoschock-Effektes im Hause Sensor-Technik Wiedemann intensiviert. Das bei der BAM aufgebaute, laserbasierte dynamische Prüfstandprinzip erwies sich nach eingehender technischer Analyse und Kalkulation als zu komplex und kostspielig, so dass im Projekt nach alternativen Verfahren gesucht wurde. Als Ergebnis von umfangreichen Untersuchungen wurde ein fluidisches Konzept für den dynamischen Drucksensor-Prüfstand ausgewählt sowie ein Versuchsmuster aufgebaut und getestet. Bei dem ausgewählten dynamischen Prinzip wird Luft in einer Kammer auf ca. 500 °C erhitzt und auf die Membrane der zu untersuchenden Drucksensorelemente geführt. Hier kann die Thermoschock-ähnliche Wirkung des Heißluftimpulses auf die Sensorelemente isoliert, d.h. ohne Überlagerung durch sekundäre Druckeffekte gemessen und analysiert werden. Beim dynamischen Testprüfstand befindet sich die Druckmesszelle in der simulierten Brennkammer, während das Sensorgehäuse außerhalb der Testkammer von Umgebungsluft gekühlt wird. Bei der zuvor für die Kalibrierung verwendeten Klimakammer wurde dagegen der zu prüfende Zylinderdrucksensor vollständig, d. h. sowohl die Messzelle wie auch das Sensorgehäuse auf die Prüftemperatur erhitzt. In Abb. 7 wird der im Projekt bei Sensor-Technik Wiedemann aufgebaute dynamische Drucksensor-Prüfstand gezeigt. Die Entwicklungsarbeiten am dynamischen Drucksensor-Prüfstand sind noch nicht abgeschlossen. Zur Zeit wird intensiv bei Sensor-Technik Wiedemann daran gearbeitet, dass der kontinuierliche Heißluftstrom durch einen Heißluftimpuls ersetzt werden kann.



Abb. 7: Dynamischer Drucksensor-Prüfstand für die isolierte Untersuchung des Thermoschock-Effektes

Zu Projektstart wurde an konventionellen, nicht optimierten Zylinderdrucksensoren ein Thermoschock-induzierter Messfehler von $> 10\%$ gemessen. Nachdem die Bedeutung des TCR-Wertes auf die Thermoschock-Empfindlichkeit der Druckmesszelle nachgewiesen und konstruktive sowie dünnschicht- und kalibriertechnische Maßnahmen zur Optimierung des TCR-Wertes erfolgreich umgesetzt wurden, konnte der Thermoschock-induzierte Messfehler auf $0,5\%$ reduziert werden. Durch Optimierung des statischen Kalibrierverfahrens wurde der Messfehler bis Mitte des

Jahres 2004 weiter auf 0,2 % verringert. Nach erfolgreicher Fertigstellung des dynamischen Drucksensor-Prüfstandes bei Sensor-Technik Wiedemann rechnen wir mit einer weiteren Verringerung des Thermoschock-induzierten Messfehlers auf < 0,15 %.

Durch Temperung der Dünnschichtsysteme konnte die Standzeit der Thermoschock-resistenten Zylinderdrucksensoren erheblich erhöht werden. Weiter erwarten wir nach Fertigstellung und Inbetriebnahme der neuen Reinräume bei der KMW GmbH eine Verbesserung der Reproduzierbarkeit bei der zur Herstellung von Thermoschock-resistenten Hochtemperatur-Messzellen erforderlichen TiON-Funktions-, Isolations- und Schutzschichten.

Ebenfalls Aufgabe von Sensor-Technik Wiedemann im Projekt war die Entwicklung und Realisierung der Hardware für die Auswertung der Zylinderdruck-Sensorsignale. Untersuchungen an Sensor-Funktionsmustern haben gezeigt, dass bei Integration der Signalvorverarbeitungselektronik direkt in den Sensor die Sensorlebensdauer durch hohe Temperaturen und Vibrationen drastisch reduziert wird. Aus diesem Grund wurde im Projektverlauf beschlossen, die Signalvorverarbeitung extern, d. h. außerhalb des Sensorsystems anzuordnen. Damit können künftig zusätzlich die beim Austausch eines Sensors entstehenden Kosten reduziert werden.

Bei Sensor-Technik Wiedemann wurde weiter eine Signalauswertungselektronik entwickelt und realisiert. In Abb. 8 wird das Blockschaltbild, in Abb. 9 die Elektronik sowie in Abb. 10 der im TSCHOCK-Projekt entwickelte Prototyp mit zwei Sensoreingängen für die Signalverarbeitung gezeigt.

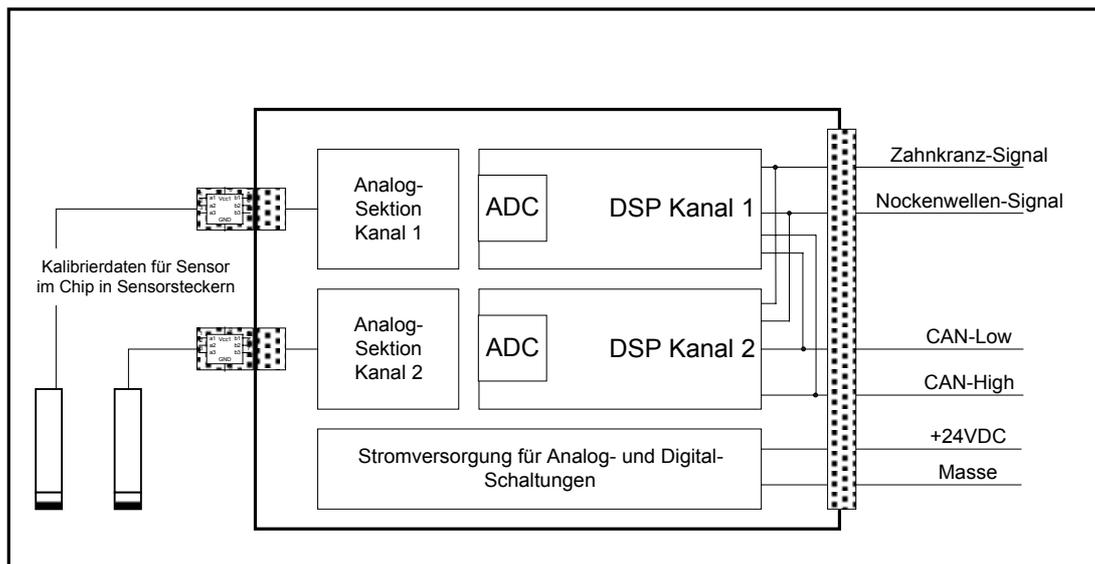


Abb. 8: Blockschaltbild der Signalverarbeitungs-Hardware

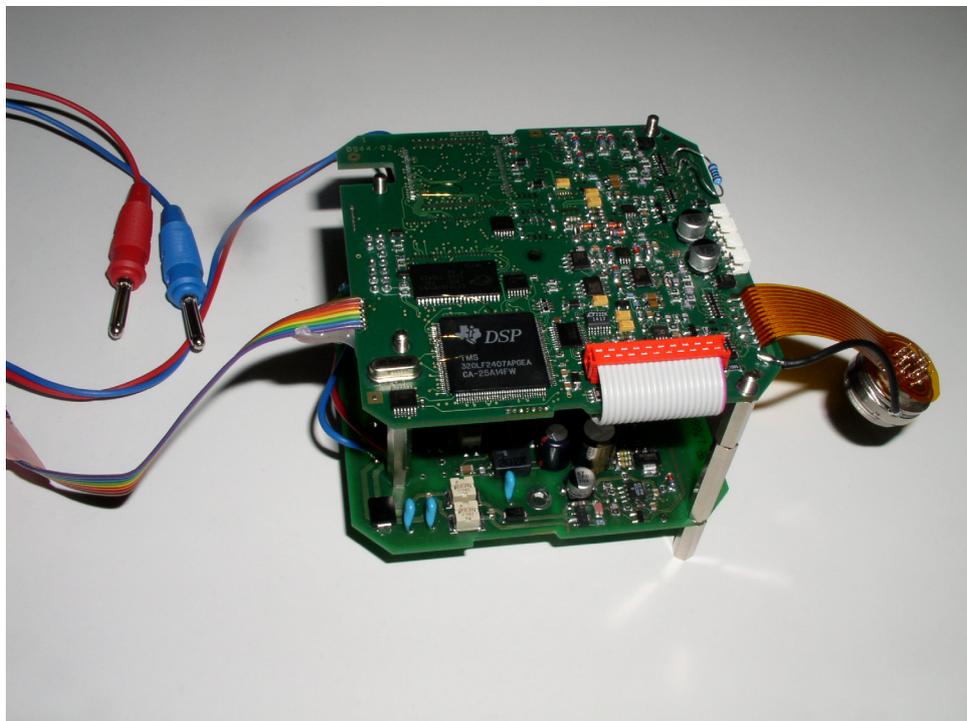


Abb. 9: Elektronik Signalverarbeitungs-Hardware

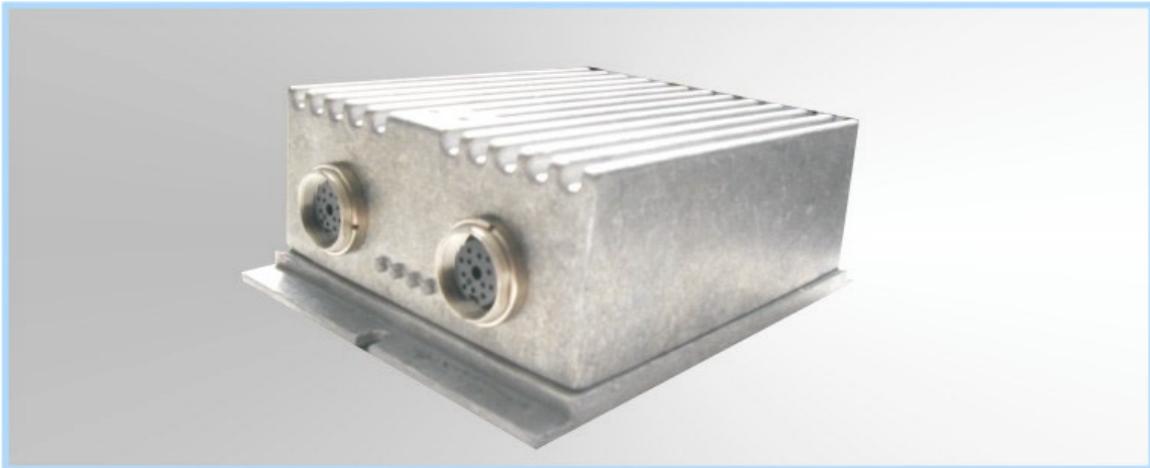


Abb. 10 Prototyp für Signalverarbeitungs-Hardware mit 2 Sensoreingängen

Auf Grundlage der zu Projektabschluss bei Sensor-Technik Wiedemann vorliegenden Ergebnisse kann festgehalten werden, dass die Thermoschock-korrigierte Messung von Zylinderdrücken im Verbrennungsprozess mit den im Rahmen des Projektes entwickelten Sensorsystemen erfolgreich nachgewiesen wurde. Die für die Regelung von Motoren erforderliche Berechnung der zylinderbezogenen Leistung aus Zylinderdrucksignalen wird voraussichtlich bis Ende 2005 abgeschlossen.

7. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im TSCHOCK-Projekt wurden umfangreiche neue Kenntnisse zur Fertigung sowie zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit von Dünnschichten, zur Reduzierung des Thermoschock-induzierten Messfehlers sowie zur Verbesserung der Aufbau- und Verbindungstechniken bei Sensor-Technik Wiedemann entwickelt. Basierend auf diesem Know-how konnte im Projekt ein Thermoschock-resistenter, langzeitstabiler Zylinderdrucksensor entwickelt und aufgebaut werden. In Labor- und Feldversuchen konnten die im TSCHOCK-Projekt entwickelten Zylinderdrucksensoren mittlerweile über eine Betriebsdauer von > 10.000 Stunden unter realitätsnahen Einsatzbedingungen getestet werden. Damit konnte der Nachweis zur Erhöhung der Standzeit von 3.000 Betriebsstunden zu Projektstart auf > 10.000 Betriebsstunden im Projekt erbracht werden. Die Feld-Langzeituntersuchungen dauern zurzeit noch an. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse gehen wir davon aus, dass das angestrebte Ziel einer Standzeit von > 15.000 Betriebsstunden für die im TSCHOCK-Projekt entwickelten Zylinderdrucksensoren bis Ende 2005 erreicht wird.

Im Projekt konnte umfangreiches Know-how im Bereich Entwicklung und Herstellung von Dünnschichten bzw. Dünnschichtsystemen erarbeitet werden. Die Beherrschung der Dünnschichtprozesse ist eine grundlegende Voraussetzung für die Herstellung von Dünnschichten bzw. Dünnschichtsystemen mit den gewünschten Eigenschaften. Das bei der Herstellung und Nachbehandlung von Dünnschichten bzw. Dünnschichtsystemen gewonnene Know-how wird zusätzlich erheblichen Einfluss auf die Optimierung von bereits bei Sensor-Technik Wiedemann existierenden sowie auf die Entwicklung von neuen Sensorprodukten haben.

Weiterer Nutzen für die Zukunft entsteht aus der im Projekt realisierten Verbesserung der Reproduzierbarkeit von Dünnschichten bzw. Dünnschichtsystemen im Fertigungsprozess. Insbesondere durch die funktionelle Abstimmung der Dünnschichtprozesse sowie die Erhöhung der Reproduzierbarkeit bei der Herstellung von Dünnschichten bzw. Dünnschichtsystemen kann der Ausschuss zukünftig erheblich reduziert und damit die Ausbeute erhöht werden.

Weiter wurde mit dem im TSCHOCK-Projekt realisierten FEM-Softwaresystem ein neues Tool für die Entwicklung von Dünnschichtsensoren bei Sensor-Technik Wiedemann eingeführt. Damit steht erstmals ein geeignetes Werkzeug zur Verfügung, mit dem die komplexen mechanischen und thermischen Prozesse während eines Verbrennungsprozesses sowohl statisch wie auch dynamisch abgebildet werden können. Hierdurch wird die zukünftige Entwicklung und applikations-spezifische Anpassung von Druckmesszellen wesentlich erleichtert und der Aufwand für Redesign-Arbeiten reduziert.

Die Projektjahre 2001 bis 2003 waren geprägt durch Entwicklungsarbeiten sowie gemeinsam mit dem Partner IMES und unterschiedlichen Motorenherstellern durchgeführten Versuchsreihen. In den Jahren 2003 und 2004 wurden zusätzlich Feldversuche mit Thermoschock-resistenten Drucksensoren unter einsatzähnlichen Bedingungen in Kraftwerken sowie in Instituten durchgeführt.

Aufgrund von zu Projektstart nicht vorhersehbaren technischen und logistischen Problemstellungen insbesondere in den Bereichen Präzision, Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit von Dünnschichten bzw. Dünnschichtsystemen sowie Neubau des Reinraums verschob sich das ursprünglich für Dezember 2003 vorgesehene Projektende auf September 2004. Damit wird sich auch die ursprünglich für Ende 2004 vorgesehene Markteinführung auf Ende 2005 verschieben.

Nach Abschluss der noch ausstehenden Optimierungsarbeiten wird die Markteinführung des neuen Thermoschock-resistenten Sensorsystems für die Messung von Zylinderdrücken in Verbrennungsmotoren voraussichtlich Ende 2005 starten. Zunächst soll das Sensorsystem inklusive Signalauswertungs-elektronik für Groß-Verbrennungsmotoren mit einer Leistung > 1.000 kW angeboten werden. Nach Auswertung der ersten Vertriebserfahrung soll die Ausweitung des Marktsegments auf andere Leistungsklassen geprüft werden.

8. Während des Vorhabens bekannt gewordene Ergebnisse Dritter

Anfang 2004 wurde von der Firma Kistler ein Zylinderdrucksensor auf Piezobasis auf dem Markt vorgestellt, der laut Angaben der Firma Kistler ohne Wasserkühlung im Langzeitbetrieb eingesetzt werden kann. Laut technischem Datenblatt verfügt dieser Sensor über eine ähnliche Funktionalität wie der im Rahmen des Projektes entwickelte Thermoschock-resistente Zylinderdrucksensor. Die Firma Kistler gibt eine Standzeit von bis zu 16.000 Betriebsstunden bei Einsatztemperaturen ≤ 350 °C an. Im Gegensatz zu dem im Rahmen des Projektes von den Partnern Sensor-Technik Wiedemann GmbH, IMES GmbH und TU Hamburg-Harburg entwickelten Thermoschock-resistenten Zylinderdrucksensors wird der von der Firma Kistler präsentierte Sensor zu einem deutlich höheren Preis auf dem Markt angeboten.

Außer dem von der Firma Kistler neu vorgestellten piezobasierten Zylinderdrucksensor wurden uns keine Entwicklungen von dritter Seite bekannt, die mit dem im Rahmen des TSCHOCK-Projektes entwickelten Sensorsystem vergleichbare Eigenschaften aufweisen bzw. für vergleichbare Anwendungen eingesetzt werden.

9. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Im Rahmen von jährlich durchgeführten Statusseminaren wurde in Fachvorträgen öffentlich über Fortschritt und Ergebnisse aus dem TSCHOCK-Projekt berichtet. Weiter wurden die Projektergebnisse im September 2004 auf dem im Rahmen der internationalen SMM-Messe in Hamburg durchgeführten Abschlussseminar rückblickend zusammengefasst und vorgestellt. Ebenfalls auf der SMM-Messe 2004 wurden erste Prototypen des im TSCHOCK-Projekt entwickelten Thermoschock-resistenten Zylinderdrucksensors auf dem Messestand des Projektpartners IMES GmbH präsentiert. Die SMM-Messe in Hamburg zählt weltweit zu den größten Fachmessen für Schiffsausrüster.

Nach Projektabschluss sind weitere Veröffentlichungen und Präsentationen der Ergebnisse aus dem TSCHOCK-Projekt geplant. Im Rahmen des von Sensor-Technik Wiedemann geplanten Praxisseminars NamiSens sollen die praktischen Ergebnisse des TSCHOCK-Projektes in Form von Fachvorträgen zu Grundlagen von neuen Dünnschicht-Technologien und kundenspezifischen Anwendungen im Juni 2005 in Mannheim vorgestellt werden.

Im Rahmen der Markteinführung sind weitere Präsentationen auf Fachmessen, wie z. B. SENSOR-Messe in Nürnberg und Hannover-Messe sowie im Rahmen von Hausmessen beim Partner IMES GmbH und Sensor-Technik Wiedemann geplant.