

# Autonomes On-Board Diagnosesystem für Hochgeschwindigkeitszüge

## Entwicklung eines kundenspezifischen Messsystems zur Schwingungsanalyse

**D**er vorliegende Beitrag beschreibt die Komponenten und den Aufbau eines autonomen Messsystems zur Schwingungsanalyse. Einsatzgebiet ist die permanente Langzeit-Diagnose der Fahrzeugflotte des Hochgeschwindigkeits-Schieneverkehrs (ICE). Neben Langzeit-Diagnose ist auch die Signalverarbeitung in Echtzeit von großer Bedeutung. Diese Anforderungen wurden durch die Verwendung eines Multiprozessorsystems bestehend aus DSP und PC erfüllt. Dabei ist eine effektive Kommunikation beider Prozessoren sehr wichtig. Das System wurde von der DSPepecialists GmbH im Auftrag des Instituts für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH entwickelt, die langjährige Erfahrung bei der Überwachung von Kraftwerken hat. Endkunden und Nutzer des Diagnosesystems ist die Deutsche Bahn AG. Momentan ist ein Versuchszug im Fahrgastbetrieb mit dem beschriebenen Diagnosesystemen ausgestattet (Abb. 4).

Die Messaufgabe besteht in der Aufnahme und Verarbeitung von 16 Beschleunigungssignalen, 8 Temperatursignalen und bis zu vier weiteren Signalen. Die Sensoren sind an unterschiedlichen Punkten des Zugfahrwerks montiert. Aufgrund der Frequenzen der Signale liegt die benötigte Abtastrate bei bis zu 32 kSamples/s. Die Verarbeitung und Analyse der Signale im Zeit- und Frequenzbereich muss in Echtzeit erfolgen, wobei die Vorgänge sowohl zeit- wie auch ereignisgesteuert sein können. Andererseits soll das System autonom, d.h. ohne Benutzereingriff bis zu zwei Jahre laufen und dabei die Messdaten zur späteren Off-line-Auswertung sichern. Das robuste Messsystem soll Wagen-autark arbeiten und über die vorhandene Zug-Leittechnik Daten austauschen.

### ► Autor

Dipl.-Ing. JENS KOLUPA ist im Bereich Projektmanagement tätig bei DSPepecialists GmbH;  
Rotherstraße 22, D-10245 Berlin  
Fon: 030/467805-0, Fax: 030/467805-99  
e-Mail: Jens.Kolupa@DSPepecialists.de



Abb. 1:  
Diagnosesystem  
(19"-Rack)

Über eine Standard-Schnittstelle kann eine Diagnose erfolgen, und es können Konfigurationsparameter geändert werden.

Auf Grund der vielfältigen und speziellen Anforderungen war die Aufgabe nicht mit Standard-Messsystemen zu realisieren, zumal die umfangreichen Verarbeitungsalgorithmen detailliert vom Auftraggeber vorgegeben waren. Als kundenspezifische Lösung wurde daher ein kooperatives Multiprozessorsystem bestehend aus einem Embedded-PC und einem DSP-System entwickelt, das alle Anforderungen erfüllt. Der Rückgriff auf einen großen Anteil von „Off-the-shelf-Komponenten“ ermöglicht zusätzlich eine schnelle Entwicklung des Gesamtsystems.

### Modularer Systemaufbau

Das gesamte System ist modular in einem 19"-Rack aufgebaut (Abb. 1). Die einzelnen Subsysteme, Netzteil, PC, Festplatte, Buskoppler und DSP inkl. Signalaufnahme sind als Einschubkassetten ausgeführt. Dies ermöglicht eine separate Entwicklung und Inbetriebnahme wie auch einen schnellen Austausch einzelner Komponenten. Pro ICE-Wagen wird ein System benötigt, da auf Grund der Datenmenge und Verarbeitungsgeschwindigkeit eine Wagen-autarke Lösung erforderlich ist.

Als PC findet ein handelsüblicher Einplattinen-Embedded-PC der Pentium-Klasse mit den üblichen Schnittstellen Verwendung.

Externe Erweiterungskarten lassen sich über die AT96-Backplane anschließen. Das Betriebssystem (Linux), die Messapplikation sowie die Konfigurationsdaten befinden sich auf einer angeschlossenen Flash-Disk, die dauerhafte Archivierung der Messdaten erfolgt auf einer Festplatte. Hier wird aus Gründen der Robustheit und des Energieverbrauchs auf eine Laptop-Platte zurückgegriffen. Mit dieser wurden schon frühzeitig erfolgreiche Testfahrten in einem ICE-Zug vorgenommen, da die verlässliche Abspeicherung der Daten eine wichtige Eigenschaft des Systems ist.

Auf dem DSP-Modul kommt ein Texas Instruments-,TMS320C6701'-Prozessor zum Einsatz. Er ist ein leistungsstarkes Mitglied (1300 MIPS / 1 GFLOPS) der 32-bit-Floating-Point-Familie C67x und verfügt über sechs parallele FP-Ausführungseinheiten. Auf dem Modul kann der Prozessor auf 256 kByte SRAM, 512 kB Flash und 32 MB externes SDRAM zugreifen.

Die Verbindung zum PC erfolgt über die Anbindung des Host-Port-Interfaces (HPI) des DSPs an den AT96-Bus des PCs. Dies ermöglicht eine hohe Transferrate bei der Verwendung eines robusten, einfachen Interfaces.

Die Signale der Sensoren werden über eine Signalkonditionierung an die Eingangsbereiche der verwendeten Analog-Digital-Umsetzer angepasst. Neben einer Pegelanpassung von Gleichspannungssignalen findet hier auch eine Anpassung an die ICP-Eingänge der Sensoren statt. Die Wandlerkarte wurde unter den Gesichtspunkten der erforderlichen Kanalan-

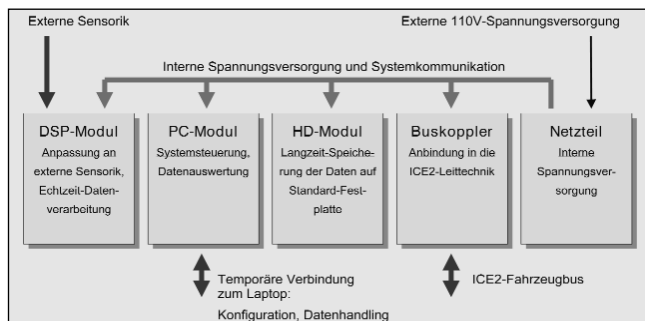


Abb. 2: Systemaufbau

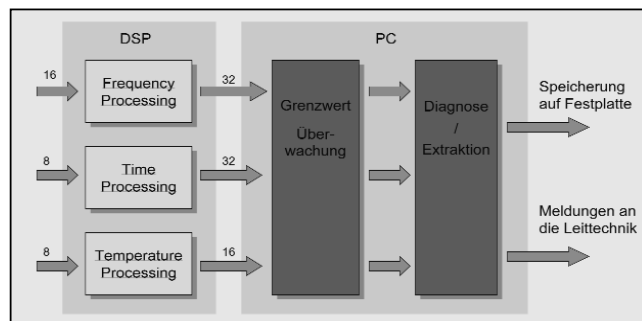


Abb. 3: Signalfluss im Diagnosesystem

zahl, der Umsetzrate von 32 kSamples/s und einer einfachen Anbindung an den DSP konzipiert und realisiert. Als AD-Umsetzer kommt der ‚AD73360‘ von Analog Devices zum Einsatz. Er enthält sechs synchrone Kanäle und kann durch sein serielles Daten-Interface mit weiteren Wandlern in Reihe geschaltet werden (kaskadiert), um die Anzahl von Leitungen zum Prozessor möglichst gering zu halten. So wurde ein Modul mit 18 synchronen Kanälen entwickelt, das an einen seriellen Port des DSPs angeschlossen wird.

Über eine Buskopplerkarte ist das Diagnosesystem in die ICE2-Leittechnik integriert. Mit Hilfe dieses sogenannten Fahrzeugbus (proprietärer 4-Draht-Bus, HDLC-Protokoll) kann es mit den anderen Zug-Systemen Nachrichten austauschen und Meldungen an den Triebkopfführer, den Zugbegleiter oder die Werkstatt absetzen.

## Software-Struktur

Die Aufgabenverteilung der notwendigen Signalverarbeitung auf die beiden Prozessoren (PC und DSP) und deren Umsetzung in Software erfolgt unter Ausnutzung der jeweiligen Stärken der Subsysteme. Abb. 3 zeigt den Signalfluss innerhalb der Software. Zu erkennen ist die Aufteilung der Verarbeitungsschritte auf den DSP und PC. Die Zahlen an den Pfeilen geben die Anzahl der Signale an.

Auf dem DSP wurde u.a. die Datenaufnahme mit Hilfe der ADCs und die aufwändige Signalverarbeitung im Zeit- und Frequenzbereich implementiert. Die DSP-Ablaufsteuerung wird durch den PC getriggert und besitzt einen Sub-Timer zur Koordinierung der internen DSP-Funktionen. Die Datenübergabe an den PC erfolgt asynchron über auf dem ‚C6x-HPI‘ aufgesetzte Kommunikationskanäle.

Sämtliche Prozesse auf dem DSP sind deterministisch, das heißt, es sind sowohl die Abfolge wie auch die Ausführungszeiten der Prozesse bekannt und konstant. Die zeitliche Abfolge der Prozesse hängt vom DSP-internen Timing und vom jeweiligen Systemkom-

mando ab, welches vom PC an den DSP über das HPI gesendet wurde. DSP-Kommandos und Prozesse werden dabei in einer ‚State-Machine‘ (Super-Loop-Technik) verwaltet, so dass auf einen aufwändigen Scheduler verzichtet werden konnte. Synchronisiert werden die meisten DSP-internen Abläufe von dem Einleseprozess der ADCs. Der Datentransfer von der seriellen Schnittstelle in einzelne, kanalabhängige Sortierpuffer im DSP-Speicher erfolgt mit einem zweistufigen DMA-Prozess. Dadurch wird für das mehrkanalige Einlesen und Sortieren der Eingangssamples nahezu keine CPU-Zeit benötigt. Stehen nach jeweils einer Sekunde in allen Kanälen die Daten in den Eingangspuffern bereit und liegt ein Messkommando vom PC vor, wird in der State-Machine die eigentliche Signalverarbeitung angestoßen. Ein einzelner Messzyklus des Systems dauert 30 Sekunden, worauf auch die Implementierung der Algorithmen und die Ablaufsteuerung in der DSP-State-Machine ausgelegt wurde.

Je nach Signalart kommen unterschiedliche DSP-Algorithmen zur Anwendung. Die Verarbeitung im Zeitbereich läuft sowohl für die Temperatursignale wie auch für die Beschleunigungssignale durchgängig, das heißt jede Sekunde gleich ab. Auf den Beschleunigungskanälen wird zusätzlich eine Verarbeitung im Frequenzbereich vorgenommen. Dazu wird über eine gewisse Zeit (< 30 Sekunden) eine FFT-Frequenzanalyse der Signale vorgenommen, aus deren Ergebnissen anschließend statistische Kenngrößen berechnet werden. Sämtliche Ergebnisse aus dem Zeit- und Frequenzbereich werden ständig über das HPI-Interface an den PC abgesetzt.

Der PC wird unter Linux betrieben, um die gute Unterstützung dieses Betriebssystems bei der Prozesssteuerung, dem File-Handling und bei der Systemsteuerung einfach nutzen zu können. Außerdem übernimmt der PC als Master die Aufgaben der Steuerung des Mess- und Analyseablaufes (zeit- und ergebnisgesteuert). Die vom DSP gelieferten Ergebnisse werden auf dem PC ausgewertet und einer Entscheidungslogik zugeführt. Die Resultate dieser Logik stellen die eigentlichen Diagno-

sedaten des Systems dar. Sie werden abhängig von ihrer Bedeutung weiterverarbeitet (z.B. Ausdünnung oder Generierung einer Meldung) und auf der Festplatte abgespeichert oder über den Fahrzeugbus weitergeleitet. Mittels einer seriellen- oder Ethernet-Verbindung kann man sich auf dem Linux-System einloggen und Änderungen an der Konfiguration vornehmen oder Daten entnehmen.

## DSP-Host-Kommunikation

Der Host-Kommunikation kommt eine zentrale Bedeutung innerhalb des Systems zu. Sie dient einerseits der Steuerung und Konfiguration des DSP-Programms, andererseits dem bidirektionalen Transfer mehrerer unabhängiger Datenströme. Der PC dient hierzu als Schnittstellen-Master, wobei beidseitig eine Interruptgesteuerte Kommunikation möglich ist. Entsprechende Treiber wurden sowohl für den DSP als auch für den PC (hier Linux und DOS) entwickelt. In einer Erweiterung ist auch das Booten des DSP über den PC möglich.

Der verwendete DSP unterstützt einen effizienten Datenaustausch mit einem Host-Prozessor über ein spezielles Host-Port-Interface (HPI) plus einen dedizierten Direct-Memory-Access (DMA) Kanal bzw. interner Adressgenerierungslogik. Diese von der DSP-CPU unabhängig agierenden Peripherieelemente ermöglichen es einem Host-Prozessor, auf DSP-internen und -externen Speicherraum zuzugreifen, ohne die DSP-CPU in ihrer Echtzeitverarbeitung zu unterbrechen bzw. zu blockieren. Da die DSP-CPU hierbei als Slave keine direkte Kontrolle über das HPI hat, bzw. eine im Hintergrund ablaufende Datenübertragung auch nicht beeinflussen kann, muss durch spezielle Steuer- und Kontrollmechanismen ein bidirektionaler Datenaustausch realisiert werden.

Ausgehend von diesen Anforderungen sind in dem System ein spezielles Hardware-Interface und verschiedene Software-Layer implementiert. Die Basis dafür bildet eine ‚Low-level-Kommunikationsschicht‘, die die Initialisierung, die Signalisierung sowie den



**Abb. 4: Diagnosemodul im Schaltschrank eines ICE2**

einfachen, ungesicherten Datenaustausch übernimmt. Die darauf aufbauenden Methoden benutzen zur Kommunikation Strukturen, sogenannte ‚Exchange-Packages‘, die, wie auch die Daten, in Ring-Puffern verwaltet werden. Diese Pakete sind sehr variabel und ermöglichen das gesamte Spektrum von einer einfachen unbenachrichtigten Einzelwort-Übertragung bis hin zum abgesicherten, protokollierten Datenaustausch.

### Drei Diagnoseebenen

Um die unterschiedlichen Diagnose-Anforderungen zu erfüllen wurden drei Diagnoseebenen eingeführt, denen spezielle Algorithmen zu geordnet sind. In der ersten Ebene werden die Fahrwerkskomponenten hinsichtlich ihrer Instandhaltung überwacht. Hierbei festgestellte Auffälligkeiten können zeitlich unkritisch in der Werkstatt behoben werden. Ist die

Beeinträchtigung größer, können in der Ebene zwei Meldungen erzeugt werden, da es unter Umständen zu einer Beeinträchtigung des Fahrverhaltens kommen kann. Ebene Drei ist der sogenannte ‚Agregatschutz‘, der plötzlich auftretende Fehler erkennt und entsprechende Meldungen einleitet. Für jede Ebene werden mit unterschiedlichen Algorithmen, wie z.B. spektrale Leistungen, Kohärenz, Kurtosis, Histogramm, RMS für jeden Kanal oder für Gruppen von Kanälen Kennwerte berechnet. Diese werden auf dem PC anhand von vorher bestimmten Grenzwerten überprüft. Um verlässliche Diagnosemeldungen zu erzeugen, die zudem unabhängig von den momentanen Betriebsbedingungen (Gleisbett, Klima, Geschwindigkeit) sind, werden diese Merkmale kombiniert und deren zeitlicher Verlauf berücksichtigt.

**TEST**

www.publish-industry.net  
**more @ click TK3C0603**

## LESERTIPP

**TEST**

**? Sie suchen nach geeigneten Anbietern für ein bestimmtes Produkt oder eine bestimmte Dienstleistung?**  
Messen • Prüfen • Verifizieren

**Im Verzeichnis ‚Wer liefert welche Produkte‘**

**(Griffmarke D.01)**

**finden Sie das gewünschte Produkt oder die gewünschte Dienstleistung sowie die Anbieter mit ihren Anschriften in alphabetischer Reihenfolge!**

**TEST!**  
**KOMPENDIUM**  
Messen • Prüfen • Verifizieren

**publish industry**  
TECHNIK KOMMUNIZIEREN

Gollierstraße 23 · D-80339 München · Fon. +49/89/500383-0 · Fax. +49/89/500383-10 · info@publish-industry.net · www.publish-industry.net