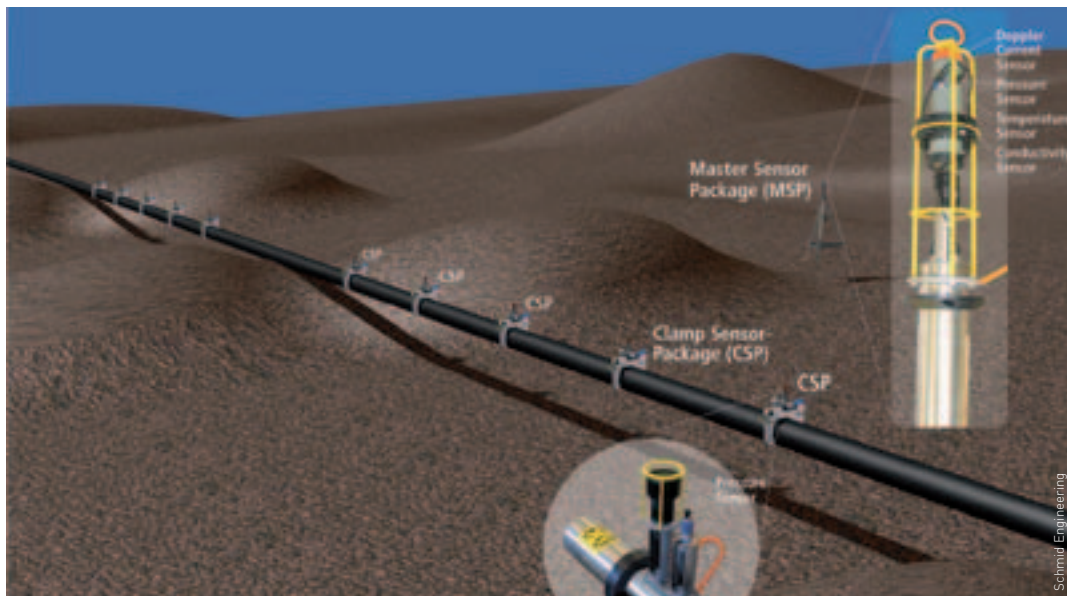


1000 Meter unter dem Meeresspiegel

Die Sensoren überwachen autonom den Zustand der Gaspipeline – ohne Kabelverbindung und nur über eine Batterie mit Energie versorgt. Entwickelt wurde die Software für die kundenspezifische DSP/Microcontroller-Hardware mit der grafischen Oberfläche Labview und einem C-Code-Generator.



Ein batteriebetriebenes Mess-Netzwerk überwacht monatlang autonom Gaspipeline-Schwingungen in der norwegischen Tiefsee.

Ormen Lange an der skandinavischen Westküste ist heute das grösste natürliche Gas-Reservoir weltweit. In Norwegens bislang teuerstem Industrieprojekt wurden 2007 zwischen Nyhamna und England insgesamt 1200 km Pipelines im Meer verlegt. Im kritischen, 120 km langen Teilabschnitt zwischen Ormen Lange und Nyhamna verlaufen die Pipelines über die «Storegga», einem 800 km langen, unebenen Gelände. An einigen Stellen haben die Röhren nicht einmal Kontakt zum Meeresgrund. In diesen frei schwebenden Bereichen wurden infolge starker Meeresströmungen Schwingungen erwartet, weshalb zur permanenten Überwachung ein Messnetzwerk der Firma Naxys installiert wurde. Die Embedded-Hard- und Software dieses Messsystems basiert auf dem Labview Embedded Module mit C-Code-Generator auf einem hybriden Mikroprozessorsystem. Neben den mathematischen Aus-

wertealgorithmen und einer umfangreichen Applikationslogik gehört eine präzise, zeit-synchronisierte 3D-Vibrationsmessung, eine 6-monatige Batterielaufzeit und eine komplette Autonomie dazu. Das ehrgeizige Projekt erforderte neben Risikobereitschaft und Ingenieursgeist eine neue Denkweise in der Produktentwicklung, um steigender Komplexität und immer strafferen Zeitplänen zu begegnen.

Zeitsynchrone Vibrationsmessung

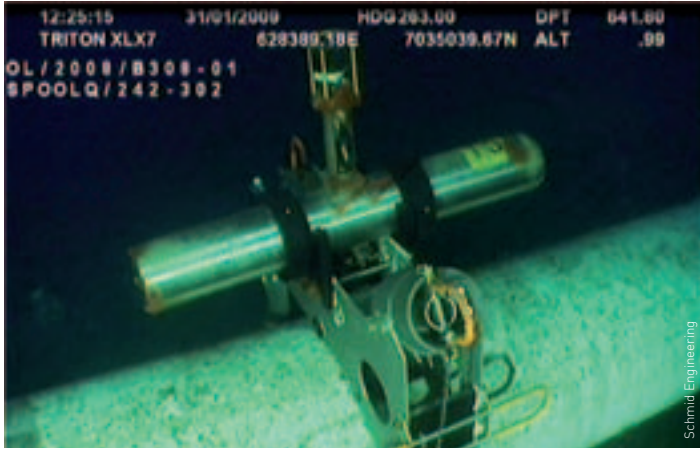
Das Pipelinemonitoringsystem besteht aus einem in der Nähe der Tiefsee-Pipeline auf dem Meeresgrund verankerten Master und mehreren Messklammern, welche direkt auf der Pipe montiert sind. Der Master synchronisiert die Messung der Klammern, indem er mit ihnen über akustische Modems und Schallwellen kommuniziert. Die drahtlose Verbindung hatte ge-

genüber einer Verkabelung bestechende Vorteile: Die Installation durch einen Unterwasserroboter wurde einfacher, zudem konnten Kollisionen des Roboters mit den Kabeln ausgeschlossen werden und nicht zuletzt Kabelbrüche aufgrund der erwarteten Pipelineschwingungen. Das präzise Vermessen der Bewegungen und Vibrationsmodi setzte voraus, dass der Loggingvorgang innerhalb aller Klammern zu exakt derselben Zeit beginnt. Bei einer Entfernung von 100 m zwischen den Knoten durfte die Gesamtabweichung 2,5 ms nicht übersteigen, was ein Timing im deterministischen zweistelligen Mikrosekundenbereich voraussetzte. Dieser Hauptanforderung wurde mit folgendem Lösungsansatz begegnet: Der Master initiiert den Messvorgang, indem er die Distanz zu jeder Messklammer akustisch misst. Umgebungsparameter wie Temperatur, Strömung und Salzgehalt verfälschen dabei die

Schallausbreitung, weshalb sie gemessen und kompensiert werden. Ein zweites Schallsignal löst die synchronisierte Messung aus. Das akustische Datenpaket enthält neben dem Trigger die jeweiligen Knotenadressen und den globalen Logging-Startzeitpunkt. Jeder Knoten misst nun die interne Softwarelaufzeit, welche zwischen dem Triggerinterrupt und dem Start der Messfunktion verstreicht, in Mikrosekunden-genauigkeit. Dank diesen Informationen weiss der Knoten jetzt genau, wann das Datalogging beginnen muss und konfiguriert den Startzeitpunkt der Analogmessung mit einem präzisen 32-Bit-Timer. Das Registrieren des Triggers und das Setzen des Timers «untertunneln» Labview und wurden direkt in «C» auf Interruptebene als Serviceroutine implementiert.

Ein halbes Jahr an der Batterie

Ein zweites hartes Kriterium war die Dauer der Messkampagnen von sechs Monaten. Das verlangte nach einem System mit einem Stromverbrauch im zweistelligen Milliwattbereich, weil der verfügbare Stauraum im Druckgehäuse die Batteriekapazität empfindlich begrenzt. Der Trick bestand darin, einen leistungsfähigen 32-Bit 500MHz Fixed-Point-Blackfin Prozessrechner, dessen Energieverbrauch zusätzlich skaliert werden kann, mit einem Ultra-Low-Power-MSP430-Microcontroller zu kombinieren. Auf dem Blackfin misst die Labview-Anwendung kontinuierlich den Stromverbrauch und die noch vorhandene Batteriekapazität. Mit Abschalten temporär nicht benötigter elektronischer Komponenten und gezieltem Skalieren der CPU-Clock wird der Stromverbrauch zur Laufzeit auf ein Minimum reduziert. Sobald die CPU wieder gefordert ist, z.B. beim Berechnen einer Floating-Point Fast Fourier Transformation, wird der Clock wieder auf DSP-Geschwindigkeit hochgeschaltet. Aus diesem Grund wurde bei einigen Algorithmen partiell auf die grafische Abstraktion verzichtet und bei niedrigem Prozessorclock die viel leistungs-



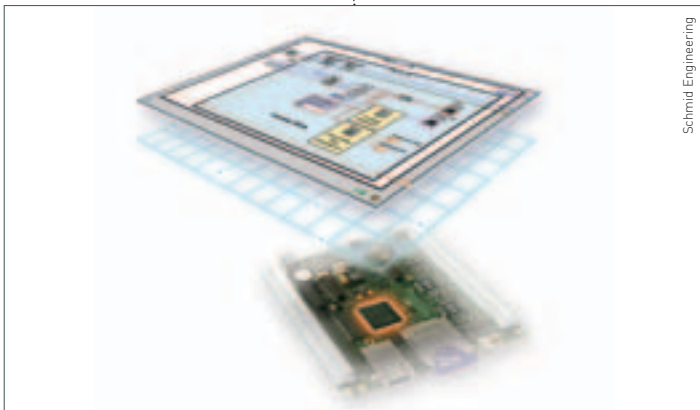
Der Dauerbetrieb in der rauen Umgebung stellt höchste Anforderungen an Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Embeddedhard- und Software.

fähigere Implementierung in Fixed-Point-Arithmetik oder sogar «C» bevorzugt. Für minimalen Stromverbrauch schaltet sich das Blackfin-Board komplett ab und lässt sich zeitgesteuert über eine Präzisions-RTC in Intervallen zwischen 30 Minuten und 3 Stunden wieder «wecken». In dieser Betriebsart misst der Ultra-Low-Power-MSP430 die Pipelineschwingungen und weckt beim Überschreiten der Grenzwerte den Blackfin-Hauptprozessor, der dank schnellen Bootzeiten innerhalb weniger Millisekunden sofort verfügbar ist. Dank diesem Energieschema haben die Messknoten die sechs Monate ausnahmslos «überlebt».

Grafische Echtzeit im Dauerbetrieb

Der dritte wichtige Designfaktor war eine komplette Autonomie während der Langzeit-Messkampagne. 1000 m unter dem

Meeresspiegel besteht keine Möglichkeit mehr, das System «von aussen» irgendwie zu retten. Konsequente Fehlerbehandlung sorgte deshalb für einen industriellen 24/7-Dauerbetrieb. Dabei wurden sämtliche Fehlermöglichkeiten auf mehreren Ebenen, vom Low-Level-Treiber bis zu Problemen in der Applikationslogik, isoliert und registriert. Die Fehlerkorrektur bestand aus mehreren Eskalationsleveln, womit jeder Knoten über die Mittel verfügte, sich selber zu regenerieren. Sämtliche Ereignisse und Fehler wurden laufend im Netzwerk kommuniziert und global verarbeitet. Trat der schlimmste Fall ein und der Masterknoten fiel aus, so konnte eine beliebige Klammer notfalls die Masterfunktion übernehmen. Der Schlüssel dazu waren zwei verschiedene Konfigurationsfiles auf der internen Solid-State-Harddisk.



Hoher Komplexität und engem Terminplan wurde erfolgreich mit grafischer Embedded Anwendungsprogrammierung (Labview auf Mikroprozessoren) begegnet.

Eine Frage der Zuverlässigkeit

Die beachtliche Komplexität und Qualität, die es in einem sportlichen Terminplan von acht Monaten umzusetzen galt, war einer der Hauptgründe, warum für diese Aufgabe die domänenspezifische Viertengenerationsprache Labview gewählt wurde. Sie schuf die Voraussetzungen für eine durchgängige und teamorientierte Entwicklungsumgebung mit dem erforderlichen Funktionsumfang, Abstraktion von Low-Level-Komplexität, integrale Typenprüfung, live Bereichsprüfung, integrierte Fehlerbehandlung, Multitasking, Echtzeitbetrieb und schlussendlich die Unterstützung eines Sprachenmixes. All das entlastete die Entwickler vor zeitraubenden Details, sodass sie sich von Beginn an auf die Funktionalität konzentrieren konnten. Den Herausforderungen an die funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit wurde mit folgenden sieben «Best Practises» begegnet: (1) ISO9001-Zertifizierter systematischer Entwicklungsprozess aller am Projekt beteiligten Firmen als Grundvoraussetzung für Nachvollziehbarkeit und Rückverfolgbarkeit. (2) Die Möglichkeit, auch mit unabhängigen Stellen Code-Reviews durchzuführen dank transparenter, objektorientierter Softwarearchitektur. (3) Ressourcenschonender Programmierstil, um den Herausforderungen limitierter CPU-Leistung und Memory zu begegnen. (4) Nutzen unabhängiger Speicherbereiche für Firmware, Konfigurationsparameter und Messdaten. (5) Low-Level-Fehlerbehandlung, CPU-Selbsttests, ROM-Test, RAM-Prüfung zur Lokalisierung von Memoryleaks. (6) Fehlerkorrektur durch gezielte Resets und Warmstarts sowie (7) Abfangen von Extremsituationen durch Kaltstarts (Watchdog). Aus der grafischen Labview Anwendung wurde schliesslich 32-Bit ANSI-C-Code generiert und zusammen mit einem schlanken RTOS über standardisierte Compiler/Linker/Loader ins Prozessorzielsystem geladen, worauf die Firmware in weniger als einer Sekunde bootet. In dynamischen Langzeittests wurden gelangt Worst-Case-

Szenarien durchgespielt und I/O- und Interruptbelastung, Messdeterministik, Ausführungszeiten, Jitter, Scheduling/Timing, Thread-Safety, Memorymanagement und Race-Conditions auf Herz und Nieren getestet. Erst dann wurde ins Meer abgetaucht.

Bewährt sich seit 4 Jahren

Die Komplexität, die hohen Entwicklungskosten und vor allem der enorme Termindruck stellte alle am Projekt Beteiligten vor neue Herausforderungen. Der Technologiemark mit Labview, C-Code-Generator und Mikroprozessorhardware erwies sich im Nachhinein als Gratwanderung, z.B. wenn der in Labview geschätzte Abstraktionskomfort zugunsten von Leistungssteigerung teilweise geopfert werden musste. Trotzdem war die grafische Anwendungsprogrammierung auf Systemlevel die richtige Wahl, denn der traditionelle, textbasierte Programmieransatz hätte die Anwendungsentwicklung um Faktor 4–6 verlängert und das Projekt wäre gescheitert. So konnte die Installation und Gasproduktion 2007 termingerecht unter Vollast starten mit der Zuversicht, dass ein Überwachungssystem kritische Pipelinezustände sofort meldet. Das System erbrachte über die letzten 4 Jahre den Nachweis, dass sich die Schwingungsamplituden im grünen Bereich bewegten. Deshalb erhöhten die Betreiber 2010 die Produktion gefahrlos um 20%. Die Herstellerfirma erwägt nun, das Pipeline-Monitoring-System weiterzuentwickeln, sodass es auch auf dem Land für eine autonome 3D-Vibrationsmessung eingesetzt werden kann. Dabei werden erweiterte Kommunikationsfähigkeiten wie Ethernet, GSM oder ein Satellitenlink erwogen. Die grafische Programmiersprache Labview wird heute also nicht nur in Automatisierungs- und Testanwendungen genutzt, sondern auch in stromsparenden Embedded-Systemen mit höchsten Ansprüchen an Funktionalität und Zuverlässigkeit. ☺

Marco Schmid, Schmid Engineering
www.schmid-engineering.ch