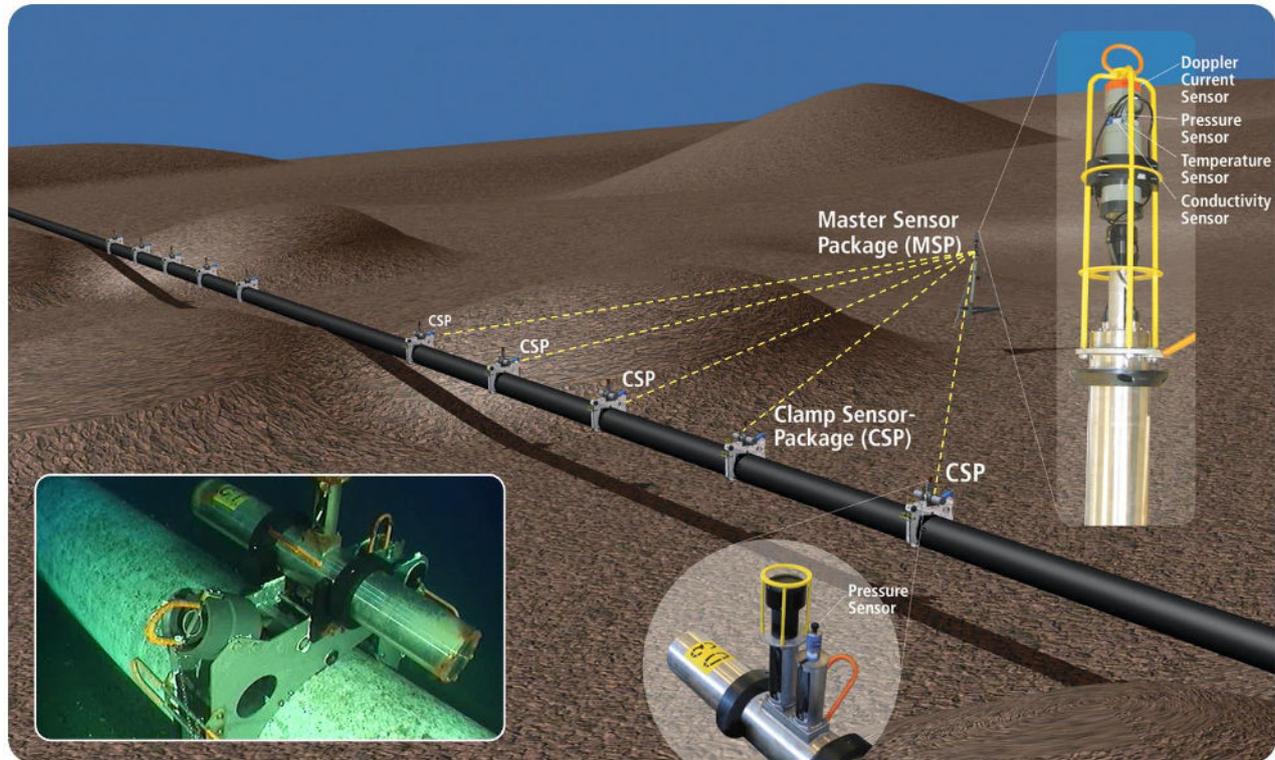


Whitepaper

LabVIEW 1000m unter dem Meeresspiegel



Ein batteriebetriebenes Mess-Netzwerk, bestehend aus einem Masterpaket (MSP) und mehreren Sensorklammern (CSP), überwacht monatelang autonom Gaspipeline-Schwingungen in der norwegischen Tiefsee (Bild: NAXYS).

Die Gasförderung in der [Ormen Lange](#) in Norwegens bislang grösstem Industrieprojekt erforderte aufgrund extremer Tiefseebedingungen permanente Zustandsüberwachung. Die hier vorgestellte Lösung, ein autonomes Pipelineüberwachungssystem, besteht aus mehreren synchronisierten Knoten, welche Vibrationen und Wasserparameter analysieren und drahtlos über akkustische Modems kommunizieren. Diese Knoten wurden in LabVIEW Embedded programmiert.

Inhalt

1	Extremsituation erfordert Zustandsüberwachung	2
2	Zeitsynchrone Vibrationsmessung	4
3	Ein halbes Jahr an der Batterie	5
4	Sechsmontatiger Dauerbetrieb	6
5	Eine Frage der Zuverlässigkeit	7
6	Bewährt sich über mehrere Jahre	8
7	Glossar	8

Das Messsystem kann unter rauen Bedingungen über lange Zeiträume eingesetzt werden und stellt höchste Ansprüche an die Zuverlässigkeit von Hard- und Software, intelligente Fehlerbehandlung und effizientes Energiemanagement. LabVIEW Embedded sorgte zusammen mit einer mikrocontroller-basierenden Hardware von Schmid Elektronik für Stabilität, Vielseitigkeit, Leistung und sechsmonatige Akkulaufzeit, die für die Erfüllung der Anforderungen an Entwicklungszeit und Qualität benötigt wurden.

Diese technische Lösung hochpräziser, synchronisierter Datenerfassung in der Tiefsee ist eine Weltneuheit. Das trifft auch auf die Anwendung grafischer Programmierung für eine Applikation dieser Größenordnung zu, welche auf einem stromsparenden Zielsystem verteilt wird.

1 Extremsituation erfordert Zustandsüberwachung

Es ist das Jahr 2006. Wir sind an der skandinavischen Westküste in der Ormen Lange. Hier befindet sich das derzeit grösste natürliche Gas-Reservoir weltweit. In Norwegens bislang teuerstem Industrieprojekt sollen zwischen Nyhamna und England insgesamt 1200 km Pipelines im Meer verlegt werden und in den kommenden 40 Jahren 20% des Britischen Gasverbrauchs abdecken (Bild 1). Beim späteren Betreiber handelt es sich um den gleichen Energiekonzern, welcher [10 Jahre später für den Shell Eco-marathon nach einer Telemetrie-anwendung](#) verlangen wird...

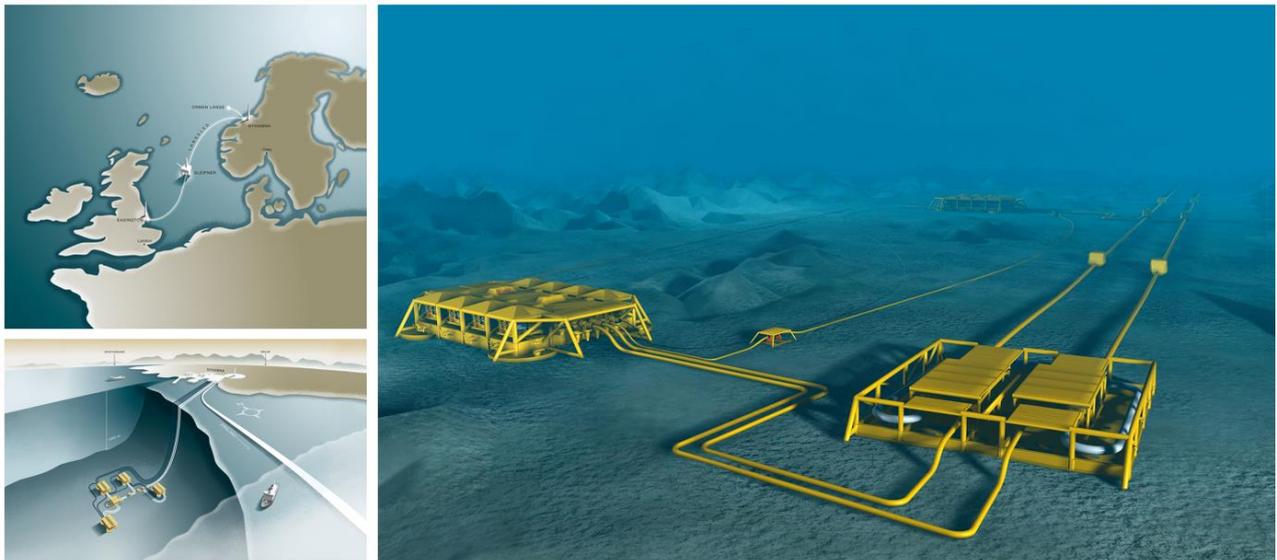


Bild 1 | Die Erschließung des Gasfeldes Ormen Lange ist das bisher grösste Industrieprojekt in der Geschichte Norwegens. Das Feld liegt vor der norwegischen Westküste in der Tiefsee und besteht aus 24 unterseeischen Bohrlöchern, verteilt auf vier Unterwasserplattformen.

Im kritischen Teilabschnitt zwischen Ormen Lange und Nyhamna werden die Pipelines über die «Storegga» verlaufen, einem 800 km langen, unebenen Gelände (Bild 2). An einigen Stellen haben die Röhren nicht einmal Kontakt zum Meeresgrund. In diesen freischwebenden Bereichen werden infolge starker Meeresströmungen Schwingungen erwartet, die zu Schäden führen könnten.

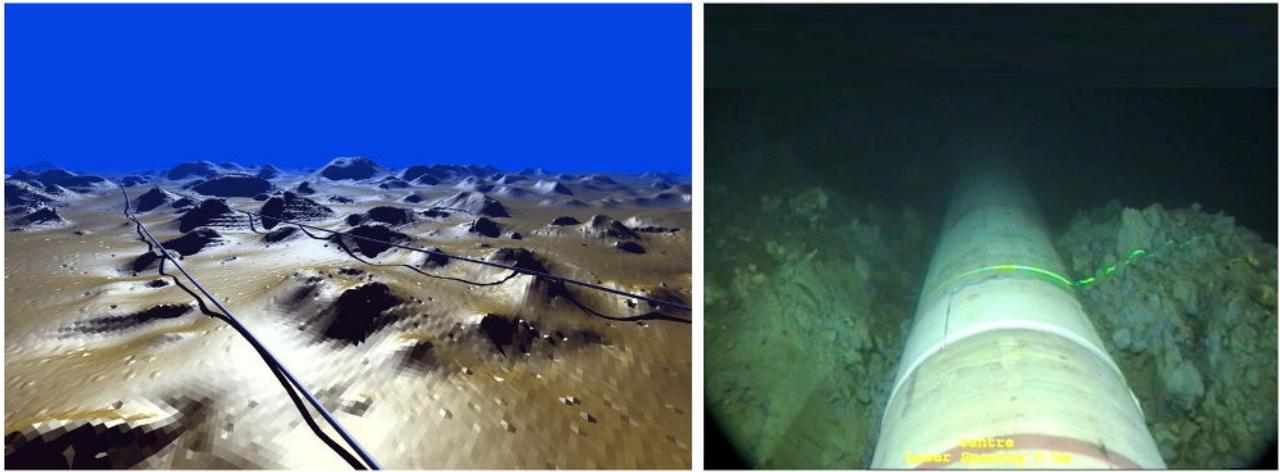


Bild 2 | Die Verlegung der Pipelines selbst stellt eines der anspruchsvollsten Projekte dar, die es im Bereich Pipelineverlegung jemals gegeben hat; hauptsächlich liegt dies am schwierigen Gelände und den starken Meeresströmungen.

Die Firma Naxys Technologies aus Bergen, Norwegen, hat sich auf Tiefseetechnologie spezialisiert und wird mit einem Messnetzwerk zur permanenten Überwachung betraut. Der Liefertermin ist fix und unter allen Umständen einzuhalten. Naxys kontaktiert das Schweizer Familien-KMU Schmid Elektronik. Schmid prüft nämlich als Early Adopter gerade die Machbarkeit von NI's allererster «LabVIEW Embedded»-Version für ihre laserbasierten Monitoringsysteme für Bahnschienen und -weichen mit dem Ziel vorbeugender Wartung.



Bild 3 | Ein Remote Operating Vehicle (ROV, links) verankert das CSP (Clamp Sensor Package, mitte) auf der Pipeline und das MSP (Master Sensor Package, rechts) auf dem Meeresboden.

Die Liga der Anforderungen an das Pipeline-Monitoring-System ist enorm hoch. Es beginnt mit einer ausgewachsenen Applikationslogik: 10x parallele Prozesse, 5x Kanäle für die Interprozess-Kommunikation, 200x teilweise beträchtliche Unterprogramme und komplexe mathematische Auswertelgorithmen, die in Echtzeit auszuführen sind. Dazu kommt eine präzise, zeitsynchronisierte 3D-Vibrationsmessung, eine 6-monatige Batterielaufzeit und volle Autonomie in der Tiefsee.

Das ehrgeizige Projekt erfordert neben Risikobereitschaft und Ingenieursgeist vor allem eine neue Denkweise in der Produktentwicklung: Abstraktion von Komplexität dank LabVIEW! Nur so sieht der Projektleiter eine Chance, der hohen Komplexität und dem straffen Zeitplan zu begegnen.

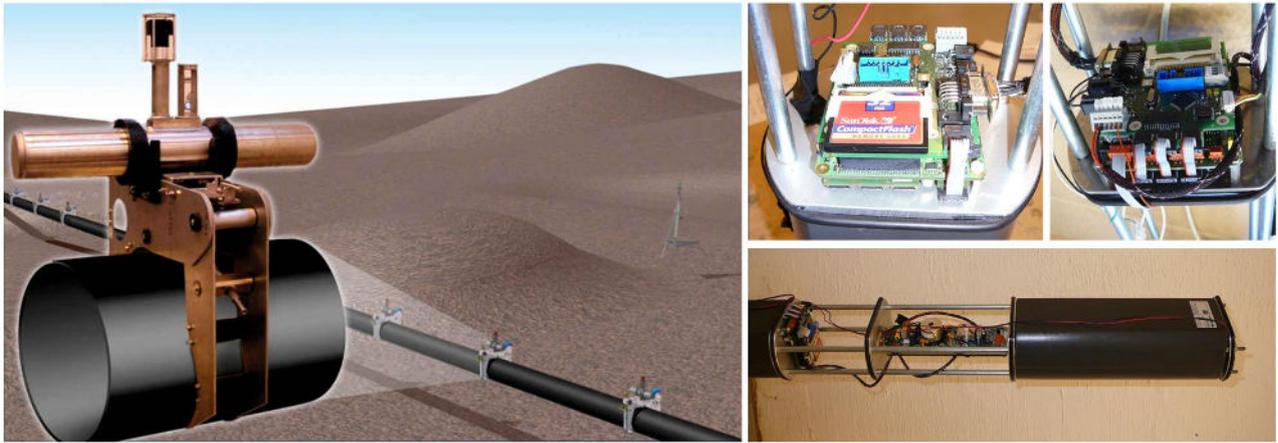


Bild 4 | Ein druchdichtes, rostfreies Stahlgehäuse enthält die Hardware, die Batteriepacks, das Modem und die Antennen.

2 Zeitsynchrone Vibrationsmessung

Das Monitoringsystem besteht aus einem in der Nähe der Tiefsee-Pipeline auf dem Meeresgrund verankerten Master (MSP: Master Sensor Package) und mehreren Knoten (CSP: Clamp Sensor Package) in der Form von Messklammern, welche direkt auf der Pipe montiert sind (Bild 1). Der Master synchronisiert die Messung der Knoten, indem er mit ihnen über akustische Modems mit Schallwellen kommuniziert.

Diese drahtlose Verbindung hat gegenüber einer Verkabelung bestehende Vorteile: Die Installation durch einen Unterwasserroboter wird einfacher, zudem können Kollisionen des Roboters mit den Kabeln ausgeschlossen werden und nicht zuletzt werden Kabelbrüche aufgrund der erwarteten Pipelineschwingungen vermieden.

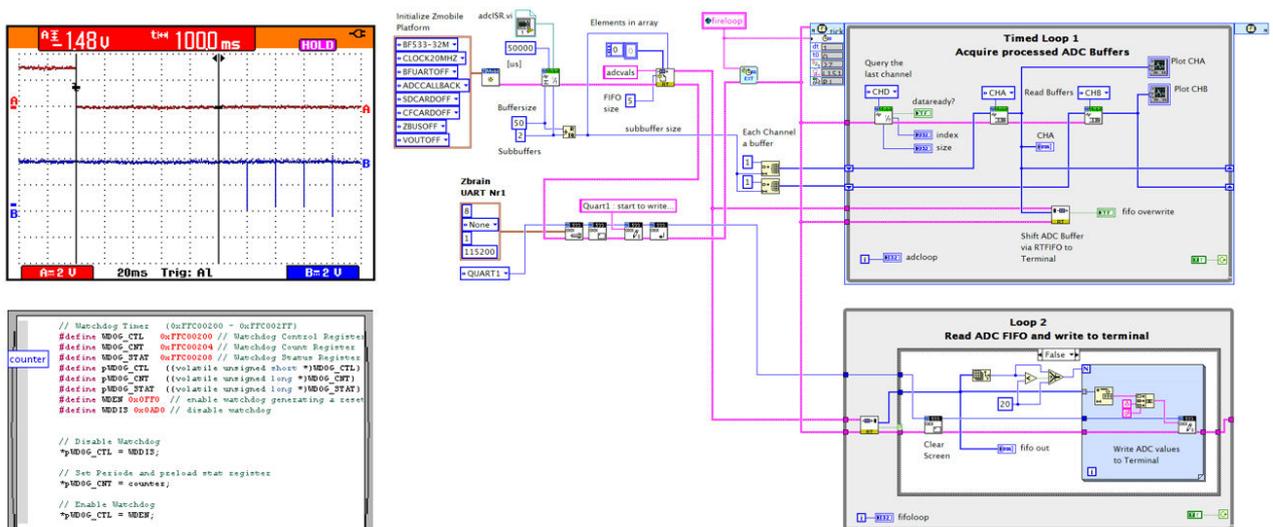


Bild 5 | Beispiel einer ereignisgesteuerten, gepufferten multiplen Analogdatenerfassung mit der geforderten Echtzeitgenauigkeit im Mikrosekundenbereich und 24/7-Betrieb.

Das präzise Vermessen der Bewegungen und Vibrationsmodi setzt voraus, dass die Messwert- erfassung innerhalb aller Knoten zu exakt derselben Zeit beginnt. Bei einer Entfernung von 100m zwischen den Knoten darf die Gesamtabweichung 2.5 ms nicht übersteigen, was knotenintern ein Timing im deterministischen zweistelligen Mikrosekundenbereich voraussetzt. Dieser Hauptan- forderung wird mit folgendem Lösungsansatz begegnet: Der Master initiiert den Messvorgang, indem er die Distanz zu jedem Messknoten 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 Startzeitpunkt für den Messbeginn. Jeder Knoten misst nun die interne Softwarelaufzeit, welche zwischen dem Trigger- interrupt und dem Start der Messfunktion verstreicht, in Mikrosekundengenauigkeit (Bild 5). Dank diesen Informationen weiss er genau, wann der Messvorgang beginnen muss und konfiguriert den Startzeitpunkt der Analogmessung mit einem präzisen Timer. Das Registrieren des Triggers und das Setzen des Timers «untertunneln» LabVIEW in «C» direkt auf der Interruptebene.

3 Ein halbes Jahr an der Batterie

Ein zweites hartes Kriterium ist die Dauer der Messkampagnen von sechs Monaten. Das verlangt nach einem System mit einem Stromverbrauch im zweistelligen Milliwatt Bereich, weil der verfügbare Stauraum im Druckgehäuse die Batteriekapazität empfindlich begrenzt.

Der Trick besteht darin, den leistungsfähigen Hauptrechner mit einem Ultra-Low-Power- Mikrocontroller zu kombinieren, einem MSP430. Dieser sparsame "Kleine" überwacht die Vibrationssensoren mit smarten Triggern und weckt nach programmierbarem Plan oder bei Bedarf den starken "Grossen" auf (Bild 6).

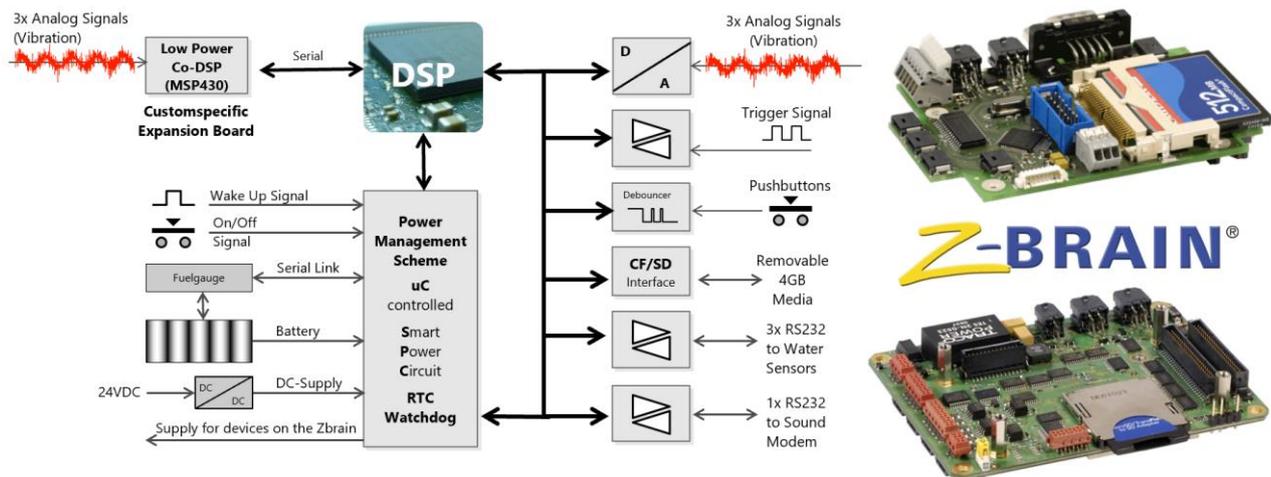


Bild 6 | Für diese Anwendung wurde ein kundenspezifisches Low-Power Embedded-System mit einem DSP als Hauptrechner und einem MSP430 als stromsparender Coprozessor entwickelt.

Daraus entstand nach erfolgreichem Projektabschluss die grafisch mit LabVIEW Embedded programmierbare Zbrain Plattform mit einem Baukasten aus Hardware und Software.

Auf dem Grossen, einem digitalen Signalprozessor (DSP), 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 FFT, wird der Clock wieder hochgeschaltet. Aus diesem Grund wurde bei einigen Algorithmen partiell auf die grafische Abstraktion verzichtet und bei niedrigem, energiesparsamen Prozessorclock die viel leistungsfähigere Implementierung in Fixed-Point-Arithmetik oder sogar eingebettetem «C» bevorzugt (Bild 7).

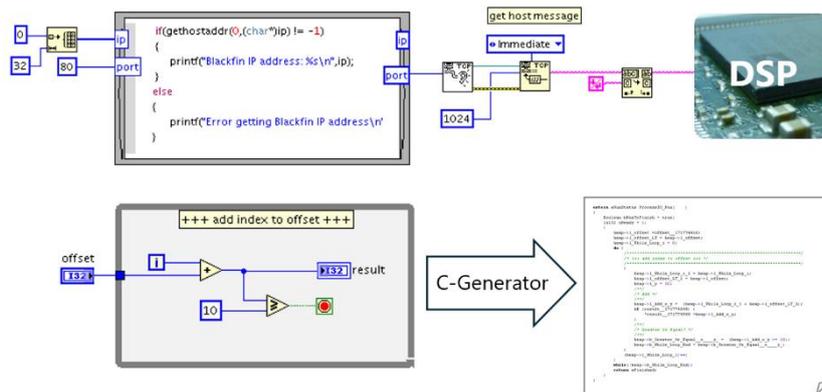


Bild 7 | Bei LabVIEW Embedded ergänzen sich der abstrakte grafische Datenfluss mit der leistungsfähigen Programmiersprache «C». Diese zwei waren nicht nur damals beim C-Generator ein erfolgreiches Paar, sondern sind es heute unter Linux immer noch.

Für minimalen Stromverbrauch schaltet sich die Hardware 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 kleine Mikrocontroller die Pipelineschwingungen und weckt beim Überschreiten der Grenzwerte den Hauptrechner, der dank schneller Bootzeiten zügig verfügbar ist. Dank diesem Energieschema haben alle Messknoten die sechs Monate überlebt.

4 Sechsmontatiger Dauerbetrieb

Der dritte wichtige Designfaktor ist eine komplette Autonomie während der 6-monatigen Messkampagne. 1000m unter dem Meeresspiegel besteht keine Möglichkeit, das System «von aussen» irgendwie zu retten. Konsequente Fehlerbehandlung sorgt deshalb für einen industriellen 24/7-Dauerbetrieb. Dabei werden sämtliche Fehlermöglichkeiten auf mehreren Ebenen, vom Low-Level-Treiber bis zu Problemen in der Applikationslogik, isoliert und registriert (Bild 8).

Die Fehlerkorrektur besteht aus mehreren Eskalationsstufen, womit jeder Knoten über die Mittel verfügt, sich selber zu regenerieren. Sämtliche Ereignisse und Fehler werden laufend im Netzwerk kommuniziert und global verarbeitet. Tritt der schlimmste Fall ein und der Masterknoten fällt aus, so kann eine beliebige Klammer notfalls die Masterfunktion übernehmen. Der Schlüssel dazu sind zwei verschiedene Konfigurationsfiles auf dem internen Speicher.

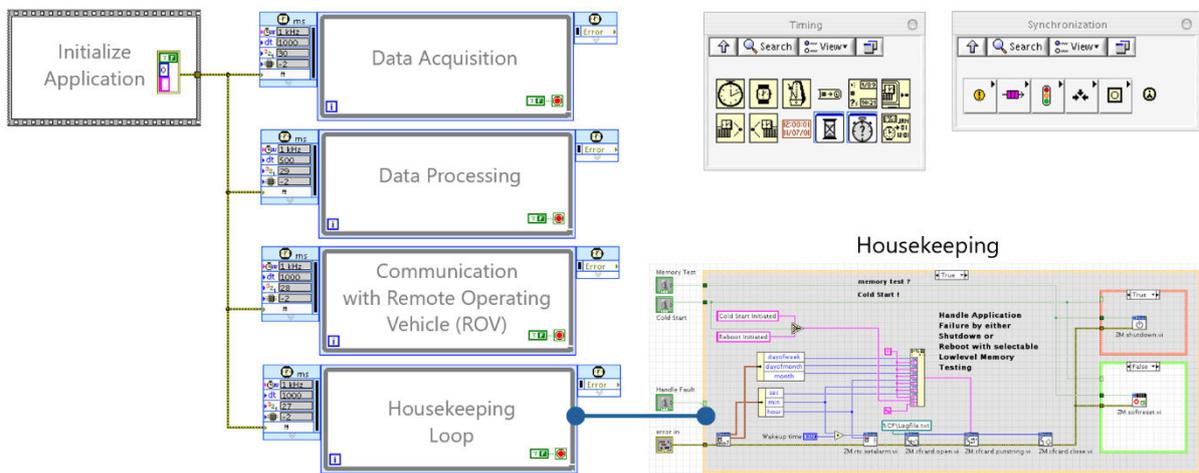


Bild 8 | Robuster Multitaskingbetrieb von bis zu zehn parallelen Schleifen mit Datenerfassung, externer Kommunikation sowie Fehlererkennung und – korrektur für eine 24/7-Verfügbarkeit.

5 Eine Frage der Zuverlässigkeit

Die beachtliche Komplexität und Qualität, die es im sportlichen Terminplan von nur sieben Monaten umzusetzen gilt, ist einer der Hauptgründe, warum für diese Aufgabe die grafische Programmierumgebung LabVIEW gewählt wird.

Sie schafft die Voraussetzungen für eine durchgängige und teamorientierte Entwicklungsumgebung mit dem erforderlichen Funktionsumfang, Abstraktion von Low-Level-Komplexität, integrale Typenprüfung, stetige Bereichsprüfung, integrierte Fehlerbehandlung, Multitasking, Echtzeitbetrieb und schlussendlich die Unterstützung eines Sprachenmixes.

All das entlastet die Entwickler von Naxys vor zeitraubenden Details, sodass sie sich von Beginn an auf die Funktionalität konzentrieren können. Den Herausforderungen an die funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit wird mit folgenden sieben «Best Practises» begegnet:

1. ISO9001-zertifizierter systematischer Entwicklungsprozess aller am Projekt beteiligten Firmen als Grundvoraussetzung für Nachvollziehbarkeit und Rückverfolgbarkeit.
2. Eine skalierbare, transparente und objektbasierte Softwarearchitektur, die auch mit unabhängigen Stellen Code-Reviews ermöglicht.
3. Ein ressourcenschonender Programmierstil, der die CPU und den Speicher schont.
4. Nutzen unabhängiger Speicherbereiche für Firmware, Konfigurationsparameter und Messdaten.
5. Low- Level-Fehlerbehandlung, CPU-Selbsttests, ROM-Test und RAM-Prüfung und Lokalisierung von Memoryleaks.
6. Fehlerkorrektur durch gezielte Resets und Warmstarts, sowie
7. Abfangen von Extremsituationen durch Kaltstarts über einen Watchdog.

In dynamischen Langzeittests werden zuerst in der Badewanne, dann in Tanks und schliesslich an der Küste tagelang Worst-Case-Szenarien durchgespielt. I/O, Prozessorbeltung, Messdeterministik, Ausführungszeiten, Jitter, Timing, Multitaskingsicherheit, Memorymanagement und Race-Conditions werden auf Herz und Nieren getestet. Erst dann wird ins Meer abgetaucht...

6 Bewährt sich über mehrere Jahre

Die Komplexität, die hohen Entwicklungskosten und vor allem der enorme Termindruck stellte alle am Projekt Beteiligten vor neue Herausforderungen. Der Technologiemix mit LabVIEW, C-Code Generator und Mikrocontroller-Hardware erwies sich im Nachhinein als Gratwanderung, z.B. wenn der in LabVIEW beliebte 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 4x 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 4 Jahre den Nachweis, dass sich die Schwingungsamplituden im grünen Bereich bewegten.

7 Glossar

Einführung Kapitel 1	Modem	Ein Modul, das Informationen (Daten) zwischen dem Gerät und der Aussenwelt austauscht.
	Early Adopter	Ein Vorreiter mit der frühen Bereitschaft, eine technologische Neuerung aufzunehmen.
	Interprozess-Kommunikation	Wenn mehrere Softwareprozesse untereinander Daten austauschen, zum Beispiel über eine Queue (Warteschlange).
Kapitel 2	MSP	Master Sensor Package
	CSP	Clamp Sensor Package
	MSP430	Low-Power 16-bit Microcontroller.
	Deterministisch	Die Ereignisse sind eindeutig vorbestimmt.
	Softwarelaufzeit	Hier: die Zeitdauer, die zwischen dem Auftreten eines Triggers und dem Auslösen der Messdatenerfassung erfolgt.
	Trigger	Auslöser
	Interrupt	Auf interne oder externe Ereignisse unmittelbar und asynchron reagieren. Dafür gibt es im Mikrocontroller eine eigene Ebene.
	Timer	Hier: ein elektronischer Zeitmesser in der CPU.
Kapitel 3	DSP	Digitaler Signalprozessor
	CPU-Clock	Hier: die Taktfrequenz (Anzahl Zyklen pro Sekunde) eines Mikrocontrollers.
	FFT	F ast F ourier T ransformation: wandelt Signale von der Zeit- in die Frequenzdomäne um.
	C	Eine allgemeine Programmiersprache.

	Fixed-Point	Festkomma-Zahl: besteht aus einer festen Anzahl von Ziffern vor und nach dem Komma. Die Position des Kommas ist fest vorgegeben. Vorteil: kann massiv schneller berechnet werden als Floating-Point.
	RTC	Echtzeituhr (Real-Time-Clock).
	Booten	Das Hochfahren eines Betriebssystems, bis die Anwendung starten kann.
Kapitel 4	24/7	Hochverfügbarer, zuverlässiger Dauerbetrieb rund um die Uhr
	Low-Level-Treiber	Hardwarenahes Ansteuern elektronischer Bausteine, z.B. AD-Wandler.
	Applikationslogik	Der Ablauf einer Software-Anwendung.
	Fehlerbehandlung	Fehler gezielt abfangen und kontrolliert darauf reagieren.
Kapitel 5	Typenprüfung	Prüfen des verwendeten Datentyps in der Software.
	Bereichsprüfung	Prüfen, ob sich eine Variable im gültigen Bereich befindet.
	Multitasking	Ausführung mehrerer, unabhängiger Aufgaben gleichzeitig.
	Echtzeit	Vorgegebene Zeit, die bestimmte Prozesse verbrauchen dürfen.
	Sprachenmix	Wenn mehrere Programmiersprachen verknüpft werden können.
	Best Practices	Beste Vorgehensweise, die sich an Erfahrung orientiert.
	ISO9001	Ein weltweit populäres Managementsystem.
	Architektur	Modularisierung, Frameworks, Objektorientierung, Design Patterns.
	Code-Reviews	Ein Mittel, um die Qualität des Codes zu verbessern.
	Firmware	Software, die den Hardwarekomponenten Maschinenbefehle erteilt.
	ROM-Test	Testen des Programmspeichers.
	RAM-Prüfung	Testen des Datenspeichers.
	Memoryleaks	Leck beim Arbeitsspeicher. Dieser nimmt zunehmend ab, irgendwann geht der Anwendung der Speicher aus und die Software stürzt ab.
	Warmstart, Reboot	Neustart eines Embedded-Systems, wenn es bereits eingeschaltet und „warm“ ist. Zum Beispiel ein geplanter Reset.
	Kaltstart	Neustart eines Embedded-Systems, bei dem das gesamte System inklusive Betriebssystem komplett zurückgesetzt wird.
	Watchdog	Funktion, welche einen Ausfall erkennt und darauf korrigierend reagieren kann. Zum Beispiel wenn sich die Software aufhängt.
	Jitter	Unterschiede in der Laufzeit einzelner Daten oder Signale. Stört massiv beim Echtzeit-Betrieb und muss berücksichtigt werden.
	Race Condition	Wenn zwei Prozesse gleichzeitig auf eine Ressource zugreifen und dann ein instabiler Zustand entsteht.
Kapitel 6	C-Generator	In diesem Kontext wird aus dem grafischen LabVIEW-Code C-Code erzeugt, der dann mit üblichen Tools in eine Firmware überführt wird. EOL seit 2017.