

Messsysteme (Molche) zur Detektion von Rissen und Korrosion in Pipelines

M. Balzer, A. Herth, N. Flatinger, H. Stripf, H. Widmann, IPE; A. Hugger, PII Pipetronix GmbH

Einleitung

Pumpfähige Massengüter werden in Rohrleitungen (Pipelines) zuverlässig und ökonomisch über große Entfernungen zu Verbrauchszentren transportiert. Ohne Pipelines wäre es nahezu unmöglich, große Industrieregionen ausreichend mit Gas, Rohöl und chemischen Produkten zu versorgen. Pipelines zählen somit zu den wichtigsten Elementen einer modernen Infrastruktur. Derzeit werden weltweit Rohstoffe durch Pipelines mit einer Gesamtlänge von schätzungsweise mehr als 2 Mio. Streckenkilometern transportiert.

Da in solchen Rohrleitungen umweltgefährdende Stoffe transportiert werden, müssen hohe Anforderungen an die Sicherheit gestellt werden. Lecks in Öl- oder Gas-Pipelines können zu Katastrophen führen. Die Hauptgefahren für Pipelines lauern zumeist in Form von Korrosion, Umwelteinflüssen und Materialermüdung, wodurch sich die Wandstärke der Rohre lokal verringern kann. Solche Schwachstellen können zu Rissen oder Brüchen führen, durch die dann Öl oder Gas austritt (s. Abb.1).

Aus diesem Grund versuchen Pipelinebetreiber derartige Schwachstellen durch den Einsatz von Messsystemen (sogenannten Molchen) frühzeitig aufzuspüren. Solche „Molche“ sind kompakte, elektronische Inspektionsgeräte, die in die Pipeline eingeschleust und von dem jeweils geförderten flüssigen oder gasförmigen Medium mitbewegt werden. Ziel ist es, mit einem derartigen Molchlauf alle sicherheitsrelevanten Schädigungen zu detektieren und präzise zu lokalisieren.



Abb. 1: Beispiel für einen Pipelineschaden, der durch Spannungsrisskorrosion verursacht wurde.

Das Forschungszentrum Karlsruhe und die Firma PII Pipetronix GmbH arbeiten seit mehr als zwanzig Jahren eng und erfolgreich an der Entwicklung von Molchsystemen zusammen. Dabei wurde auf der Grundlage der Ultraschall- und Magnetsensortechnologien Hardware und Software zur Erfassung, Komprimierung und Speicherung der Sensordaten entwickelt.

Durch die Kooperation mit dem Forschungszentrum erlangte die Firma PII Pipeline Solutions eine weltweit führende Stellung in der Pipeline-Inspektion. In einer Reihe von Technologietransfer-Projekten wurde ein ganzes Produktspektrum von Molchen gemeinsam neu entwickelt oder auf der Basis vorhandener Geräte verbessert:

- Korrosionsprüfmolche auf Basis von senkrecht einstrahlenden Ultraschallsensoren
- Korrosionsprüfmolche basierend auf magnetischer Streu-

flusstechnik für die quantitative Korrosionsüberwachung

- Rissprüfmolche zur Detektion und Größenbestimmung von Rissen mit Hilfe schräg einschallender Ultraschallsensoren
- Molche mit kombinierter Ultraschalltechnologie (gleichzeitige Messung von Korrosion und Rissen) auf Basis von Ultraschallgruppenstrahlern
- Rissprüfmolche zur Detektion von Rissen in Gaspipelines auf Basis der EMAT-Technologie (Electromagnetic Acoustic Transducer)

Die während des Molchlaufs anfallenden Daten werden direkt im Molch verarbeitet, komprimiert und abgespeichert. Dabei müssen die erfassten Daten in Echtzeit um bis zu einem Faktor 150 000 reduziert werden, bevor sie abgespeichert werden.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurden am Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE) des Forschungszentrums stromsparende und platzsparende Supercomputer mit massiv paralleler Struktur entwickelt und gefertigt, die auch unter den extremen Bedingungen einer Pipeline zuverlässig funktionieren. Die Online-Algorithmen des Molches zur Datenreduktion arbeiten dabei nach modernsten Methoden der Datenreduktion, Datenkompression und Mustererkennung.

Nach Abschluss eines Molchlaufs werden die abgespeicherten Messdaten aufbereitet und auf externe Datenträger übertragen. Mit spezieller Auswertesoftware werden die Messdaten dargestellt und von einem Expertenteam bewertet. Als Ergebnis erhält der Pipelinebetreiber einen Bericht über den aktuellen Fehlerzustand des untersuchten Pipeline-Abschnitts [1, 2, 3, 4].

Molchaufbau am Beispiel eines Ultraschallmolches

Wie in Abb. 2 schematisch dargestellt, besteht der Molch aus verschiedenen separaten Einheiten (Molchkörpern), die über Gelenke und Kabel miteinander verbunden sind. Die Aufteilung ist notwendig,

damit der Molch Pipelinebögen durchfahren kann. Die Ultraschallmesstechnikeinheit steuert die Sensoren, die Ultraschallpulse aussenden und wieder empfangen. Die empfangenen Signale werden digitalisiert und entsprechend reduziert. Die so verarbeiteten Messdaten werden dann im Datenspeicher abgelegt.

Die Batterieeinheit versorgt den Molch mit der notwendigen elektrischen Leistung. Die Batteriekapazität wird auf die Länge des zu prüfenden Leitungsabschnitts ausgelegt, der bis zu 1000 km lang sein kann.

Die Dichtmanschetten bewirken, dass der Molch vom zu transportierenden Medium mitgeführt wird. Die Odometerräder liefern wegabhängig die Takte für die Auslösung der Ultraschallmessungen und die Information über den zurückgelegten Weg. Die Schussfrequenz der Ultraschallsensoren ist so gewählt, dass in Längsrichtung mit jedem der Ultraschallprüfköpfe ca. alle 3 mm eine Messung durchgeführt wird.

Der Sensorträger wird an die jeweilige Messtechnik angepasst. In Abb. 2 wird ein Sensorträger für den Korrosions- und Rissprüfmolch gezeigt. Der Sensorträger ist so ausgelegt, dass der gesam-

te Rohrfumfang durch die Sensoren abgedeckt ist. In Umfangsrichtung ergibt sich dabei ein Sensorabstand von etwa einem halben Sensordurchmesser (ca. 8 mm). Dadurch ist gewährleistet, dass jeder Bereich der Rohrwand in Umfangsrichtung mehrfach beschallt wird [2, 3, 4].

Molchtypen basierend auf Ultraschalltechnik

Molch zur Korrosionsprüfung

Beim Korrosionsprüfmolch basierend auf Ultraschalltechnik ist der Sensorkopf (Piezoschwinger) senkrecht zur Rohrwand ausgerichtet und wird dabei längs der Pipeline bewegt. Dabei wird die Wanddicke für jede Sensorposition nach dem Pulsecho-Prinzip ermittelt[2].

In Abb. 3 ist das Messprinzip verdeutlicht. Es sind für verschiedene Wanddicken die vom Sensor erfassten Echozeiten dargestellt: Das Rohrinnenwandecho (Vorlaufecho) hat die Laufzeit vom Sensor zur Wand und wieder zurück. Die Wanddicke ergibt sich aus der Differenz zwischen Innenwand- und erstem Außenwandecho bzw. aus der Differenz zweier benachbarter Folgeechos multipliziert mit der Schallgeschwindigkeit.

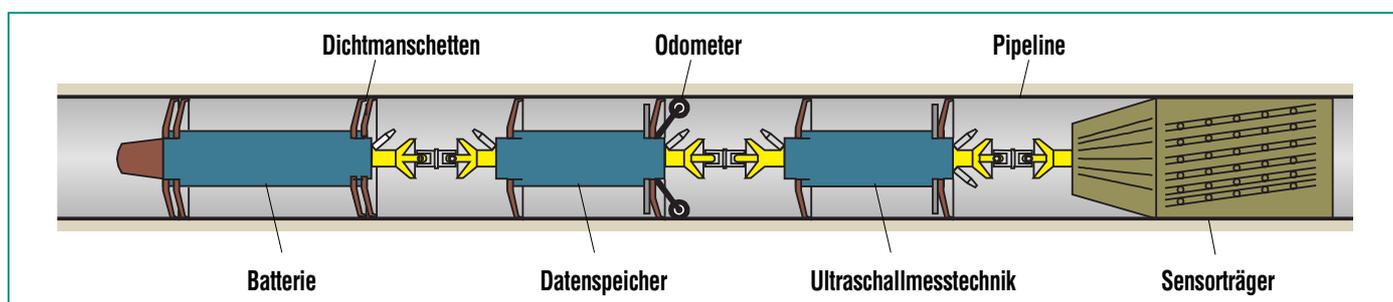


Abb. 2: Darstellung eines Ultraschallmolches bestehend aus vier Molchkörpern.

Die Sensorköpfe arbeiten in einem Frequenzbereich von ca. 5 MHz, damit kann eine Auflösung der Messung kleiner als 0,1 mm erzielt werden [1, 2].

Molch zur Rissprüfung

Im Gegensatz zur Wanddickenprüfung werden bei der Rissprüfung die Sensorköpfe nicht senkrecht, sondern unter einem Winkel von ca. 17° zur Normalen auf dem Sensorträger angebracht. Beim Auftreffen auf die Rohrwand werden die einfallenden Schallwellen nach dem Brechungsgesetz abgelenkt. Der Einschallwinkel ist so gewählt, dass die Ultraschallwellen sich in der Rohrwand unter einem Winkel von 45° zur Oberfläche ausbreiten. Radial verlaufende Außen- oder Innenrisse können damit empfindlich nachgewiesen werden, da der Ultraschall von diesen in der Regel stark reflektiert wird (Winkelspiegeleffekt) [2]. Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in der Abb. 4 gezeigt [3].

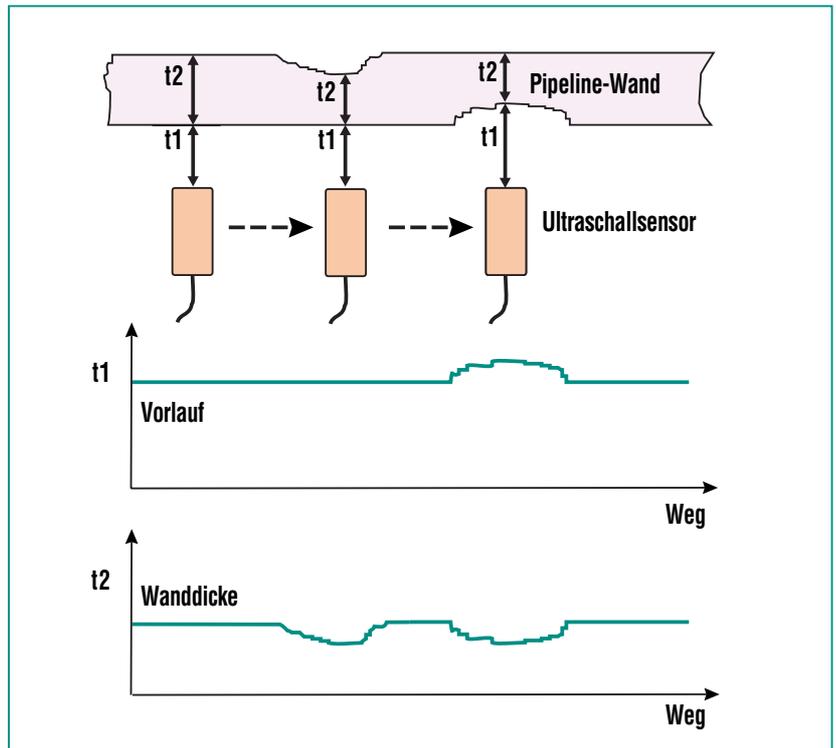


Abb. 3: Messprinzip der Wanddickenmessung. Durch den Vortrieb des Molches wird der Ultraschallsensor über die Wand bewegt. Die Vorlaufzeit (t_1) und die Differenz zwischen dem Vorlaufzeit und dem Außenwandecho (t_2) oder zwischen zwei Außenwandechos werden aufgezeichnet. Bei externen Defekten ändert sich die Laufzeit der Wandechos, die Vorlaufzeit bleibt gleich. Bei Innenkorrosion ändern sich beide Zeitwerte.

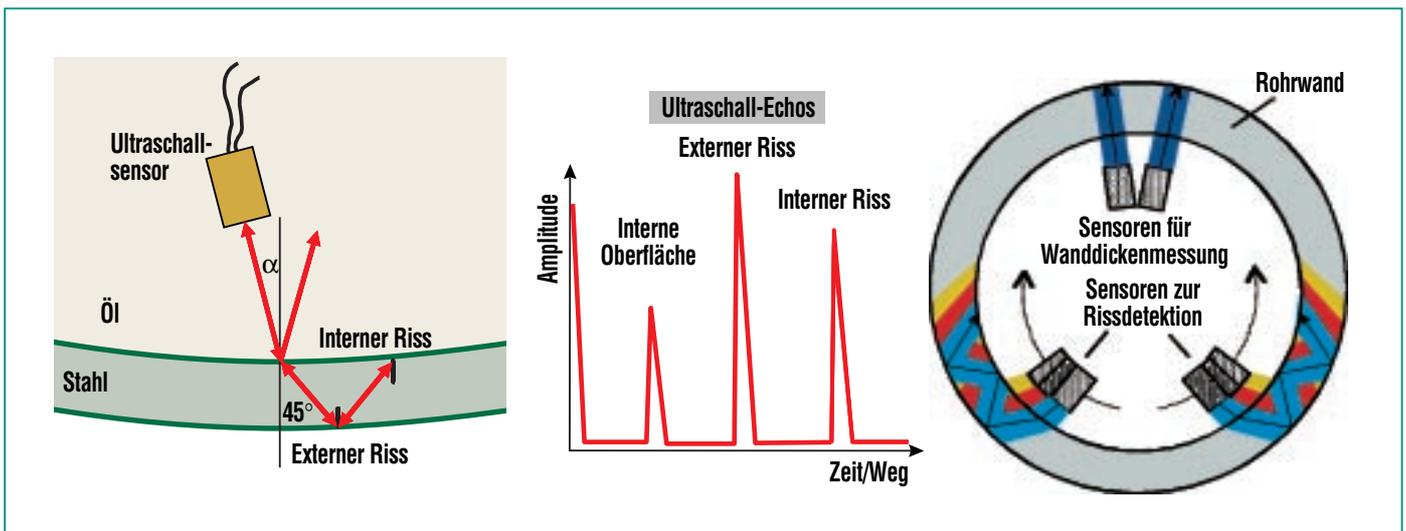


Abb. 4: Messprinzip der Rissmessung. Die Sensoren werden so angeordnet, dass ein Riss von mehreren Sensoren erkannt wird.

Molch mit Ultraschallgruppenstrahlern

Um unterschiedliche Messaufgaben wie Rissprüfung und die Detektion von Korrosion zu erfüllen, werden in der Regel unterschiedliche Inspektionsmolche mit den jeweils passenden Sensorenanordnungen eingesetzt. Dies ist mit entsprechend hohen Mobilisierungskosten verbunden. Messdaten, die mit unterschiedlichen Molchen aufgenommen worden sind, müssen zudem erst korreliert werden, bevor sie gemeinsam ausgewertet werden können.

Aus diesen Gründen wurde ein Inspektionsmolch entwickelt, welcher auf der Technologie von Gruppenstrahlern (engl. Phased Array) basiert. Der Hauptvorteil dieser Technologie besteht darin, dass man die Größe, die Form und die Richtung des Ultraschallbündels mit elektronischen Mitteln steuern kann. Dies eröffnet ganz neue Möglichkeiten:

- Rissprüfung und Korrosionsmessung können gemeinsam in einem Lauf durchgeführt werden.
- Größe und Überlappung der Ultraschallsensoren können elektronisch an die individuelle Messaufgabe angepasst werden.
- Der Einschallwinkel eines Sensors kann entsprechend dem aktuellen Pipeline-Medium variiert werden.

EMAT-Molch für Gaspipelines

Der Emat-Molch ist ein Inline-Inspektionstool, das zur Detektion von längsorientierten, rissartigen

Fehlern in Gaspipelines unter Verwendung von Ultraschall eingesetzt wird.

In Gaspipelines kann die „klassische“ Ultraschalltechnik nur eingesetzt werden, wenn der Molch in einem Flüssigkeitsbett geführt wird, da ein Koppelmedium zur Einbringung der Ultraschallenergie in die Pipelinewand benötigt wird. Bei der EMAT-Technologie wird der Ultraschall über elektromagnetische Kräfte in der Rohrwand selbst erzeugt, so dass kein flüssiges Ankoppelmedium benötigt wird.

Datenverarbeitung und Elektronik

Datenfluss

Die große Herausforderung beim Aufbau einer Molchelektronik besteht in der geforderten Echtzeitverarbeitung bei der hohen Datenrate, die im Molchsystem anfällt. Abhängig vom Durchmesser der zu untersuchenden Pipeline tasten bis zu 11000 Ultraschallsensoren die Pipeline-Wände auf Korrosion und Risse ab. Bei einer 250 km langen Pipeline kann dabei eine Datenmenge von mehr als 15 Mio. GBytes mit einer Datenrate von bis zu 67 GByte/s anfallen. Da diese Datenmenge online nicht auf einem robusten Massenspeicher abgelegt werden kann, mussten spezielle Rechnersysteme und Reduktionsalgorithmen entwickelt werden, die nur die relevanten Daten in komprimierter Form abspeichern. Je nach Molchtyp kommen verschiedenen Reduktionsverfahren zur Anwendung.

Bei der Korrosionsprüfung sind in erster Linie die gemessenen Wand-

dicken von Interesse. Daher werden an unkritischen Stellen nur die online berechneten Vorlauf- und Waddickenwerte gespeichert. An kritischen Stellen werden zusätzlich auch die gemessenen Ultraschallsignale abgespeichert.

Bei der Rissprüfung gilt es die Ultraschallsignale zu erkennen, die Rissinformationen tragen. Zum Nachweis von Längsrissen werden die Echos in den Signalen nach mehreren Kriterien geprüft. Zum einen müssen sie einen genügenden Abstand zum Rauschuntergrund aufweisen (Ansprechschwelle) und zum anderen über eine gewisse Länge in Längsrichtung (Längenkriterium) auftreten. Durch die Einbeziehung von Nachbarschaftskriterien werden auch schräg liegende Risse erkannt. Werden alle Kriterien erfüllt, so erfolgt eine komplette Abspeicherung der zu diesem Anzeigebereich gehörenden Ultraschalldaten.

In Abb. 5 ist der Datenfluss für die Rissprüfung mit dem Gruppenstrahlermolch in den einzelnen Verarbeitungsstufen dargestellt. Die Molchelektronik reduziert/komprimiert die Daten dabei online in vier Stufen:

1. Dephasing:

Es beinhaltet das Zusammenfügen der Daten der einzelnen Elemente eines virtuellen Sensors (Reduktion ca. Faktor 16).

2. Vektorisierung:

Es wird eine Vektorisierung der Ultraschalldaten durchgeführt, d. h. es wird die Laufzeit und die maximale Amplitude der Einhüllenden des Ultraschallechos berechnet und als Amplituden-Zeit-Vektor

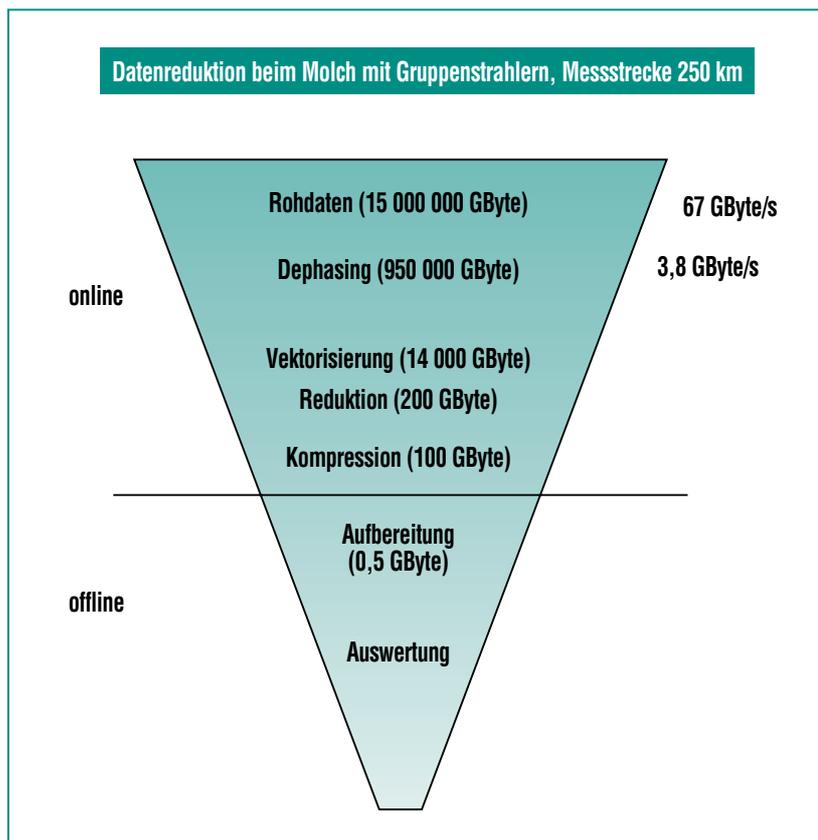


Abb. 5: Darstellung des Datenflusses beim Molch mit Gruppenstrahlern in der Rissprüfung.

weiterverarbeitet (Reduktion ca. Faktor 70).

3. Reduktion:

Es wird ein schnelles Online-Verfahren zur Erkennung und Selektion von rissähnlichen Strukturen durchgeführt. (Reduktion ca. Faktor 50).

4. Kompression:

Es beinhaltet ein einfaches und schnelles Verfahren zur Datenkompression (Kompression ca. Faktor 2).

Die verbleibenden 100 GByte an Daten werden online auf robuste Massenspeicher (Flash-Memories) abgelegt. Die Offline-Verarbeitung erfolgt nach dem Prüflauf.

Aufbau des Rechnersystems zur Datenerfassung und Reduktion

Für den Entwurf des Rechnersystems müssen neben der Datenverarbeitung noch weitere Aufgaben berücksichtigt werden, die für die Steuerung des Gesamtsystems notwendig sind. Grundsätzlich soll die Elektronik folgende Aufgaben erfüllen:

1. Ansteuerung der Sensorik
2. Datenaufnahme mit Digitalisierung der Sensorsignale
3. Datenreduktion
4. Datenkompression

5. Datenaufnahme der Umgebungsdaten (Odometer, Pendel, Druck, ...)

6. Generierung von Datenblöcken

7. Datenspeicherung auf Massenspeicher

8. Parametrisierung und Steuerung der Messsysteme

9. Fehlerbehandlung und Protokollierung

Konventionelle Computersysteme finden im Molch keinen Platz, auch benötigen sie zu viel Energie. Durch das vorgegebene maximale Volumen der Molchkörper und der beschränkten Kapazität der Batterie eines Molchsystems besteht die Anforderung an das Rechnersystem darin, auf möglichst kleinem Raum eine hohe Rechenleistung bei geringem Leistungsbedarf und hoher Flexibilität zu erzielen. Zudem muss dieses in der rauen Umgebung einer Pipeline störungsfrei arbeiten.

Diese Anforderungen wurden am IPE durch die Entwicklung und Fertigung von stromsparenden Supercomputern mit massiv paralleler Struktur, die auch unter den extremen Bedingungen in einer Pipeline zuverlässig funktionieren, erfüllt.

Für das Rechnersystem wurde ein modularer Aufbau gewählt. Es besteht aus einzelnen Rechnerkomponenten für spezielle Aufgabenbereiche, die durch möglichst einfache Kommunikationskanäle miteinander verbunden sind. In Abb. 6 ist das System in seinen einzelnen Komponenten dargestellt. Die vier Rechereinheiten sind: Frontend, Massenspeichereinheit, Systemkontroller und Überwachungs-

einheit. Sie besitzen alle ein einheitliches Prozessormodul.

Die Systemkomponenten und ihre Funktion:

- Ultraschallelektronik – Sensoransteuerung
- Frontends – Datenreduktion
- Systemkontroller – Gesamtsystemsteuerung
- Überwachungseinheit – Erfassung von Umgebungsdaten, Fehlerprotokoll
- Massenspeichereinheiten mit Flash-Memories – Datenspeicherung

Die Sensorsignale werden von der Ultraschallelektronik analog aufbereitet und an die Frontends gesendet. Die Frontends digitalisieren die analogen Signale der Ultraschalleinheiten und reduzieren sie nach vorgegebenen Algorithmen. Anschließend werden die Daten über Ethernet zur Massenspeichereinheit gesendet.

Der Systemkontroller hat die Kontrolle über den gesamten Molch. Er übernimmt die Steuerung des Messablaufs und organisiert das dafür nötige Zusammenspiel der anderen Rechereinheiten. Dabei reagiert er auch auf Zustands- und Fehlermeldungen, die er von allen anderen Einheiten empfängt. Somit überwacht er die Funktionstüchtigkeit der Systeme und kann bei etwaigen Ausfällen entsprechend reagieren. Er übernimmt außerdem die Erzeugung der Taktimpulse für die Ultraschallelektronik. Diese werden aus den Odometerimpulsen abgeleitet. Zudem sendet der Systemkontroller Weg- und Lageinformationen (Pendel) zur Massenspeichereinheit, wo sie

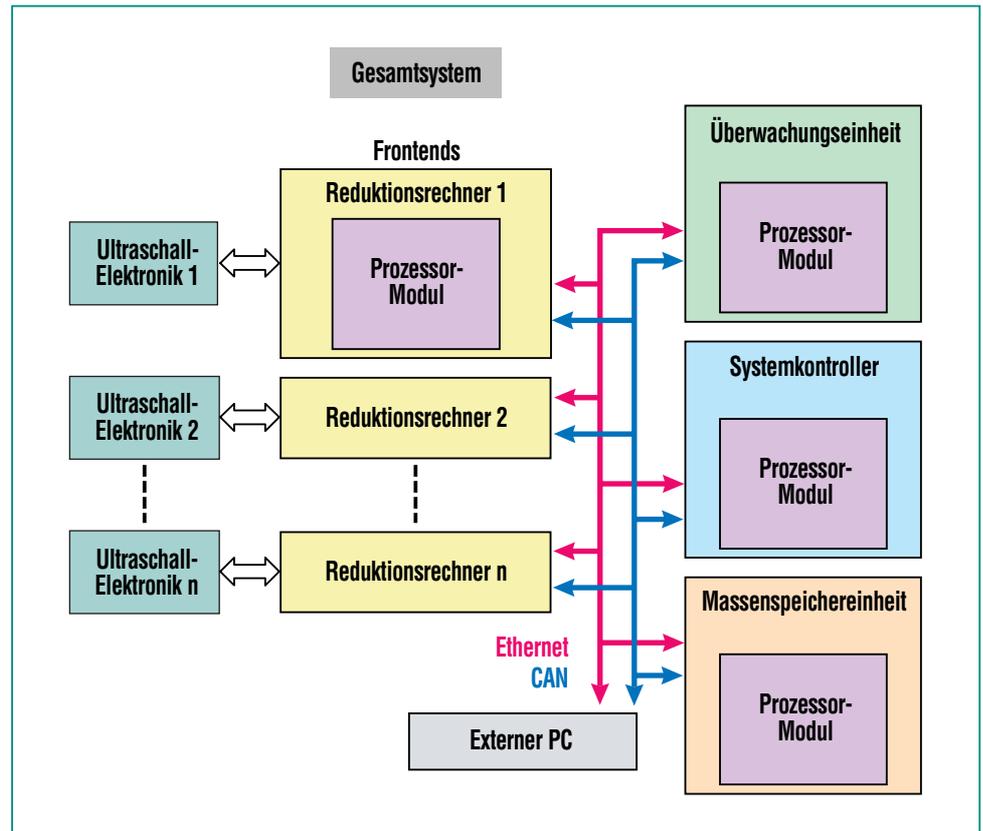


Abb. 6: Aufbau des Rechnersystems im Prüfmolch.

mit den Messdaten zusammen abgelegt werden.

Auf der Überwachungseinheit werden wichtige Umgebungsdaten wie Temperatur, Druck, Beschleunigungen etc. aufgenommen und abgespeichert. Zusätzlich protokolliert die Einheit sämtliche Fehlermeldungen, die von den anderen Einheiten versendet werden.

Durch Verwendung von einheitlichen Prozessor-Modulen, werden Programmierung und Wartung der verschiedenen Rechereinheiten vereinfacht. Um den Verdrahtungsaufwand zu reduzieren, sind die Kommunikationskanäle seriell ausgelegt. Die Rechereinheiten sind über Ethernet und CAN-Bus redundant miteinander

verbunden und können von einem externen PC programmiert und parametrieren werden.

Frontend-Elektronik

Zentrale Bestandteile der Rechereinheit Frontend sind die ADCs (Analog-to-Digital-Converter) zur Analog-Digital-Wandlung, ein FPGA (Field-programmable gate array) und ein Prozessormodul. Als Prozessor wurde ein Signalprozessor (DSP, digital signal processor) ausgewählt, der auch Mikrokontrollerfunktionen beinhaltet. Die Core-Spannung und die Taktfrequenz des Prozessors können in einem weiten Bereich dynamisch geändert werden, so dass sich die Leistungsaufnahme an die individuellen Anforderungen im Molch

anpassen lässt. Zudem bietet der ausgewählte DSP eine hohe Rechenleistung bei geringer Verlustleistung.

Die Verbindung zwischen komplexem, frei programmierbarem FPGA und DSP erlaubt ein Höchstmaß an Flexibilität und Parallelisierung, um die Anforderungen der verschiedenen Molchtypen bezüglich Rechenleistung, Volumenbedarf, Wärmebelastung und Leistungsaufnahme zu erfüllen. Die Datenreduktion, als zentraler Bestandteil des Systems, wird teilweise im FPGA und teilweise im DSP ausgeführt. Der Datenaustausch zwischen FPGA und DSP erfolgt über ein Shared RAM (Random access memory). Kommandos und Interrupt-Signale werden direkt ausgetauscht.

In Abb. 7 ist der Datenfluss auf dem Frontend vom ADC über FPGA zum DSP dargestellt. Die Datenverarbeitung erfolgt in mehreren Schritten und verteilt sich über die einzelnen Komponenten.

Jeder ADC digitalisiert Sensorsignale und speist sie nacheinander in den FPGA ein. Jedes Sensorsignal erfährt vier Verarbeitungsstufen im FPGA:

1. **Stufe E:**
Daten einlesen und filtern
2. **Stufe P:**
Peak-Detektion
3. **Stufe I:**
Peak-Selektionsalgorithmus
4. **Stufe L:**
Signalverfolgung

Wie in Abb. 7 zu sehen ist, ist die Verarbeitung im FPGA parallel und in einer Pipelinestruktur organisiert. Durch die Pipelinestruktur wird erreicht, dass die Verarbeitungsstufen parallel auf nacheinander folgenden Signalen arbeiten. Von vier ADCs werden nun gleichzeitig Signale eingelesen und das – wegen der Pipelinestruktur – im Takt einer Verarbeitungsstufe.

Der FPGA sendet die so reduzierten Signale an den DSP. Dort erfolgt

eine weitere Reduzierung auf der Grundlage von Merkmalsextraktion und Nachbarschaftsbetrachtungen. Die reduzierten Daten werden anschließend in einem zweistufigem Kompressionsverfahren (Delta Modulation und LZW-Verfahren) nochmals um den Faktor 2 verlustfrei verdichtet und anschließend über Ethernet zur Speichereinheit versendet [6].

Literatur

- [1] H. Goedecke, G. Krieg, H. Stripf *Ultrascan Survey in gas pipelines with batch technology*, Proc. 2nd Int. Conf. on pipeline inspection, Moscow, 1991
- [2] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer Verlag Berlin 1990
- [3] H. Willems, O.A. Barbian, H. Stripf, *UltraScan CD a new tool for crack detection*, Proc. 7. International Pipeline Monitoring Seminar, Houston, 1995
- [4] H. Gemmeke, *Crack Detection with Ultra Sound*, Proc. 3rd International Pipeline Symposium, Berlin, Germany, 2000
- [5] J. Bosch, A. Hugger, J. Franz, S. Falter, Y. Oberdörfer, *Phased Array-Technologie für automatisierte Pipeline-Inspektion*, Proc. DACH – Jahrestagung 2004, Salzburg
- [6] M. Balzer, H. Stripf, *DSP Multiprocessor System for online Ultrasonic Data Reduction*, Proc. GSPx The International Signal Processing Conference, Santa Clara, USA, 2004

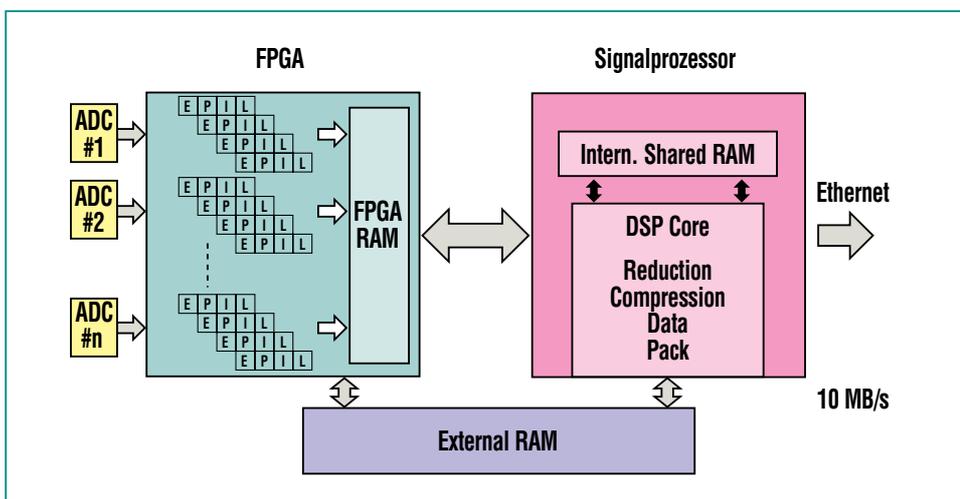


Abb. 7: Aufbau der Frontend-Recheneinheit. Der Datenfluss erfolgt von den ADCs, über den FPGA zum DSP und von dort über Ethernet zur Speichereinheit. Besonders effizient ist die Parallelverarbeitung im FPGA durch die Pipelinestruktur.