

## Entwicklung akustischer Meßverfahren zur Detektion des Kanalzustandes

Dr.-Ing. O. Klingmüller, GSP, Mannheim, Germany

Dr. rer.nat. R. Schmitt, FhG-IBMT, St.Ingbert, Germany (Co-Autor)

Verbundvorhaben mit Unterstützung des Bundesministers für Forschung und Technologie

Abwasserverband Saar, AVS Saarbrücken

Fraunhoferinstitut für Biomedizinische Technik, Abteilung Ultraschall, St. Ingbert

HYDAC Technologie GmbH, Sulzbach

GKW Ingenieure, Ingenieurbüro für Wasserwirtschaft, Umwelttechnik und Infrastruktur GmbH,  
Mannheim

GSP Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode mbH,  
Mannheim

Beitrag zum BMFT-Statusseminar beim 4. Internationalen Kongreß "Leitungsbau" 1994 in Hamburg

### Zusammenfassung

Die Entwicklung von Meßverfahren zur Kanalinspektion auf der Grundlage der Erfassung von Schwingungen und Vorgängen bei der Ausbreitung mechanischer Wellen wird beschrieben. Durch Klopfen wie bei der Klangprüfung von Steinzeugrohren werden hierbei Bewegungen im unteren Frequenzbereich (100 - 10.000 Hz ) angeregt, mit piezoelektrischen Sensoren werden Bewegungen im Ultraschallbereich (50.000 - 2.000.000 Hz) angeregt. Die Verfahren ereignen sich zur Rißdetektion und Untersuchung der Muffenbeschaffenheit, Bestimmung der Bettung und der Restwandstärke bei Betonkorrosion. Wenn die Positionierung ohne Kanalvideo vorgenommen werden kann, ist auch der Einsatz im gefüllten Kanal möglich. Nach erfolgreichen Versuchen im Labor wurden Prototypen gebaut, um den Einsatz in nichtbegehbaren Kanälen zu erproben. Zur Ermittlung der Leistungsgrenzen wurde ein Kanaldemonstrationszentrum mit Kanälen aller gängigen Bauarten und Materialien erstellt, in welchen die üblicherweise anzutreffenden Fehlstellen simuliert sind. Für die praktische Anwendung wurde im Rahmen des Projektes auch die Schnittstelle zur Anbindung an eine Kanaldatenbank mit Schadenskataster vorbereitet.

### Abstract

The development of detection techniques on the basis vibrations and the phenomena of propagation of mechanical waves is described. Hammer impacts comparable to the well-known knocking sound test of ceramics are exciting vibrations in the low frequency range (100 - 10.000 Hz ) whereas piezoelectric transducers are used to produce movements and wave propagation in the ultra-sonic frequency range ( 50.000 - 2.000.000 Hz). The new techniques are capable of detecting cracks as well as the conditions of connectors, embedding characteristics and the determination of the remaining thickness of corroded concrete. If positioning can be done without an inspection TV, the methods can be applied also in water filled channels. After successful tests in the laboratory remotely operated prototypes have been constructed to be utilised in inaccessible small diameter channels. For the determination of limits of the applicability a demonstration centre has been built where several sewage lines of a number of different designs and materials with generally found faults and defects have been installed. For practical application the project includes the definition of the interface to a channel data bank and a coded damage register.

1. Einleitung
2. Akustische Meßverfahren
  - 2.1 Schallreflexionsanalyse
  - 2.2 Ultraschall
3. Rißdetektion
  - 3.1 Mit Schallreflexionsanalyse
  - 3.2 Mit Ultraschall
4. Muffen
5. Untersuchung der Bettung
  - 5.1 Mit Schallreflexionsanalyse
  - 5.2 Mit Ultraschall
6. Untersuchung der Restwandstärke mit Ultraschall
7. Geräteprototypen für in-situ-Messungen
8. Das Kanaldemonstrationszentrum in Burbach
9. Einbindung der Ergebnisse in eine Kanaldatenbank und Verbesserung der Schadensklassifikation
10. Ausblick

## 1. Einleitung

Der immense Bedarf an Sanierungsmaßnahmen für schadhafte Abwasserkanäle in den kommenden Jahren erfordert den gezielten Einsatz der zur Verfügung stehenden Mittel für die Behebung der Schäden nach einem Dringlichkeitskatalog. Zur Vermeidung von Fehlentscheidungen muß ein solcher Dringlichkeitskatalog auf einer möglichst umfassenden Beschreibung des Kanalzustandes und einer darauf aufbauenden Prognose der Schadensentwicklung aufgebaut sein.

Die Beurteilung des Kanalzustandes erfolgt zur Zeit ausschließlich auf der Grundlage der Videoinspektion, also durch Interpretation des Sichtbaren. Die interessierenden und für die Schadensbeurteilung wichtigen Rohreigenschaften, wie Rohrintegrität, Durchlässigkeit von Rissen, Integrität von Muffenverbindungen, Bettung sind aber nicht sichtbar. Die Beurteilung erfolgt damit indirekt und ist von der aktuellen Situation, der Leistungsfähigkeit der Kamera und der Erfahrung des Betrachters abhängig. Die Standardisierung der Schadensbeschreibungen durch die ATV in ihrem Merkblatt 143 konnte diese Unsicherheit zwar verringern, aber nicht beseitigen. Zudem fanden einige Anwender den dort zusammengestellten Katalog von Schadensbeschreibungen unzureichend und haben diesen durch weitere Sätze ergänzt. Dementsprechend muß für ein gegebenes Videobild mit einer gewissen Bandbreite von Interpretationen und sogar mit Fehlinterpretationen gerechnet werden.

Um diesem Mangel abzuhelpfen, wurde seitens des BMFT der erste Teil eines Förderprogramms der Entwicklung von neuen Inspektionsmethoden gewidmet als Ergänzung oder Alternative zur Videoinspektion. Die Untersuchung von Rohrschwingungen sowie Ausbreitungscharakteristiken, Reflexionen und Refraktionen mechanischer Wellen ist Gegenstand eines Verbundprojektes im Rahmen dieses Programms. Je nach dem untersuchten Frequenzbereich wird zwischen *Schallreflexionsanalyse* (hörbarer Bereich 100 bis 10 000 Hz) und *Ultraschallanalyse* (nicht hörbarer Bereich 50 bis 500 kHz) unterschieden.

Während die Schallreflexionsanalyse, also die Messung im hörbaren Frequenzbereich, auf die Erfahrungen aus der bekannten Klangprüfung von Steinzeugrohren aufbaut, kann die Ultraschallanalyse die bekannten Methoden der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung nutzen und auf die fortgeschrittenen Verfahren der Signaldarstellung aus dem Bereich der medizinischen Diagnostik zurückgreifen.

Im Gegensatz zur Videoinspektion wird bei beiden Verfahren das Rohrmaterial direkt angesprochen, da die Übertragung eines eingeleiteten mechanischen Signals durch das Rohrmaterial untersucht wird.

Im Verbund aus einem Kanalnetzbetreiber, einem Dienstleistungsunternehmen für zerstörungsfreie dynamische Prüfmethode im Bauwesen (GSP Mannheim), einem Forschungsinstitut für Ultraschalltechnik (FhG - IBMT; St. Ingbert), einem Unternehmen der Prozeßtechnologie (Hydac, Sulzbach) und einem im Abwasserbereich tätigen Unternehmen des beratenden Ingenieurwesens (GKW Mannheim) wird gemeinsam eine Prüftechnik entwickelt, die eine verbesserte Zustandsbeurteilung und auch eine Prognose der Schadensentwicklung erlaubt. Die Aufteilung der Arbeitspakete erfolgte dabei nach dem spezifischen Know-how der Verbundpartner:

- Der **Abwasserverband Saar** übernahm die Gesamtprojektleitung und gewährleistet die Berücksichtigung der tatsächlichen Erfordernisse der Kanalnetzbetreiber, indem er ein speziell für die Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Inspektions- und Sanierungsmaßnahmen ausgelegtes Kanaldemonstrationszentrum erstellt.
- Die **Abteilung Ultraschall im Institut für biomedizinische Technik der Fraunhofergesellschaft** entwickelt die Methoden der Ultraschallanalyse.
- Die **Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode** entwickelt die Methoden der Schallreflexionsanalyse.
- Die **Hydac Technology GmbH** konstruiert und baut nach Angaben der Verfahrensentwickler Geräte, die die prototypische Anwendung in Rohrleitungen erlauben.
- Die **GKW** bereitet die Schnittstelle zur Kanaldatenbank vor und ermöglicht damit die Einbeziehung der Ergebnisse der neuen Detektionsmethoden in die Erstellung eines Schadensbildes und Dringlichkeitskatalogs.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die durch das Projekt additiv und komplementär bzw. alternativ zur Videoinspektion mittels der akustischen Verfahren zu gewinnenden Schadensparameter erläutert und ihre meßtechnische Erfassung skizziert. Sodann werden die bisherigen Ergebnisse von Messungen im Labor und in situ und eine sich darauf gründende Vorgehensweise zukünftiger Kanalinspektion vorgestellt sowie die Auslegung und Funktion des gerade für diese Zwecke erstellten Kanaldemonstrationszentrums beschrieben.

## 2. Akustische Meßverfahren

### 2.1 Schallreflexionsanalyse

Traditionell wird die Güte und Integrität von Keramik aller Art unter anderem nach dem Klang beurteilt. Steinzeugrohre werden im Rahmen üblicher Qualitätskontrolle nicht nur während des Herstellungsverfahrens (z.B. vor dem komplizierten und teuren Prozeß des Aufbringens des Muffenmaterials) mit einem massiven Metallstab, sondern auch vor dem Einbau auf der Baustelle mit einem Hammer angeschlagen und anhand des Klanges wird die Integrität beurteilt. Eine Schädigung des Rohres macht sich durch eine andere Tonhöhe (Frequenz) oder durch ein veränderte Klangfarbe und Klangdauer (Dämpfung) bemerkbar.

In der Steinzeugindustrie wurde durch mehrjährige Untersuchungsreihen versucht, einen Zusammenhang zwischen dem Klangbild eines intakten Rohres und der nach DIN 1230 nachzuweisenden Scheiteldruckfestigkeit herzustellen. Ein solcher Zusammenhang konnte zwar im statistischen Mittel hergestellt werden, es hat sich aber noch nicht als wirtschaftlich erwiesen, aus diesen Ergebnissen eine automatisierte Qualitätssicherung auf der Basis der Klangprüfung einzuführen. Aufgrund der vielen Versuche, die mit Rohren aller Art durchgeführt wurden, ergab sich aber, daß aus den Klangsignalen auf die Integrität der Rohre bzw. auf bestimmte Schadensbilder geschlossen werden konnte.

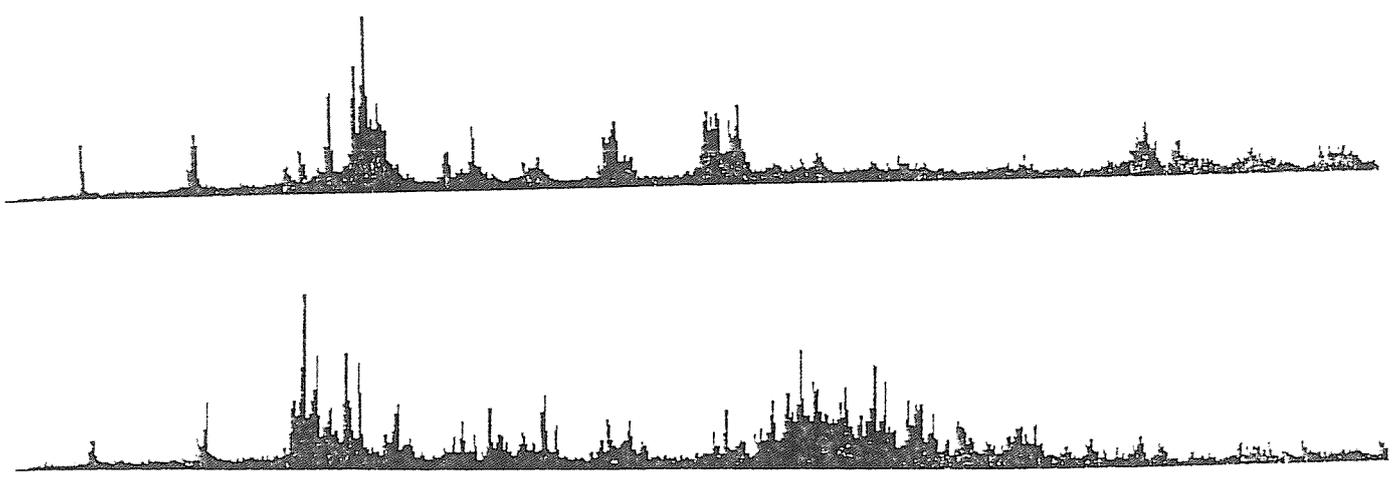


Bild 1 : Summen-Frequenzbilder der Klangprüfung von Steinzeugrohren  
DN 200 - Frequenzbereich 0 bis 2.000 Hz  
Muffe (oben) und Spitzende (unten)

Entsprechend der Position der Klangprüfung im Herstellungsprozeß der Steinzeugrohre, wurden diese Prüfungen an frei schwingenden Rohren, die auf Förderbändern aufliegen, mit einer Impulsanregung, Schlageinleitung, von außen, durchgeführt. Schallmessungen mit einem Mikrofon während dieser Klangprüfung zeigten, daß intakte Rohre charakteristische Eigenschwingungen aufweisen. Diese sind zwar individuell unterschiedlich, aber bei einer Mittelung über mehrere Rohre zeigt sich, daß die jeweiligen Eigenfrequenzen einem schmalen Frequenzband angehören. Hierbei muß unterschieden werden zwischen einem Anschlagen der Muffe und einem Anschlagen des Spitzendes.

Auf der Grundlage dieser Erfahrungen ergaben sich für die Übertragung der Klangprüfung auf eine Prüfung verlegter Steinzeugrohre folgende Arbeitshypothesen :

1. Ein irgendwie beschaffenes und im Boden eingebettetes Rohr besitzt charakteristische Eigenfrequenzen.
2. Durch Klopfen wird ein Rohr zum Ausschwingen angeregt. Dieser Ausschwingvorgang wird durch die Eigenfrequenzen aufgebaut, d.h. die Eigenfrequenzen können durch Messungen des Ausschwingvorgangs bestimmt werden.
3. Bei frequenzgesteuerter Anregung können die Eigenschwingungen aus der Resonanz erkannt werden.
4. Eine beliebige Anregung (Rauschen, Hintergrundseismizität) wird durch die Eigenschwingungen des Rohres gefiltert. Durch Messungen der gefilterten Bewegungen am Rohr können die Rohreigenschaften ermittelt werden.
5. Bettungsunterschiede lassen sich als Dämpfungsunterschiede bestimmen.
6. Ein Riß behindert die Wellenfortpflanzung, so daß bei symmetrischer Meßanordnung unsymmetrische, in der Phase verschobene Signale erzeugt werden.

Für die Entwicklung der Verfahren für einen Einsatz zur Kanalinspektion wurde folgendes Arbeitsprogramm aufgestellt :

1. Grundlagen der Signalerzeugung und Signalaufnahme,  
Bestimmung von Signalmustern für Rohre  
Computersimulation von Rohrschwingungen
2. Analyse von Hintergrundgeräuschen und Mikroseismizität
3. Entwicklung eines Prototyps zur Inspektion nichtbegehrter Abwasserkanäle mittels Schallreflexionsanalyse

Die Grundlagen der Signalerzeugung und Signalaufnahme wurden durch Messungen im Labor bestimmt. Es wurden alle möglichen Methoden der Schlaganregung einschließlich der in der Werkzeugprüfung gebräuchlichen Impulshämmer untersucht. Für die Messung der Rohrbewegungen wurden ebenfalls eine Anzahl Schwinggeschwindigkeits-, und Beschleunigungsaufnehmer sowie Verstärker verschiedener Hersteller eingesetzt. Es zeigte sich, daß ein Stahlhammer mit gerundetem

Kopf, wie er im Schmuckhandwerk benutzt wird, sowie gängige piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer die besten Ergebnisse liefern. Zur Bestätigung der gemessenen Frequenzbilder wurden Messungen bei frequenzgesteuerter Anregung, der Frequenzbereich von 0 bis 2000 Hz wurde hierbei in 10 Minuten durchfahren, und Messungen bei Rauschanregung mit Signalstapelung im Frequenzbereich durchgeführt. Bei frei schwingenden Rohren wurden mit allen Methoden dieselben Frequenzbilder erzeugt, so daß sichergestellt war, daß die Rohreigenschaften vollständig erfaßt sind.

Weiterhin wurden im Labor ein intaktes und ein gerissenes Rohrstück jeweils in einer mit Sand gefüllten Tonne eingebettet. Bei der Übertragung der Anregungs- und Meßtechnik auf die gebetteten Rohre zeigten sich schon die grundsätzlichen Schwierigkeiten bei der Anwendung des Verfahrens zur Kanalinspektion.

- 1. Die Bettung ist so stark, daß die freie Bewegung des Rohres wesentlich behindert wird. Für das versteifte System ergibt sich damit eine erhöhte Grundfrequenz.
- 2. Die starke Dämpfung verhindert auch die Anwendung der klassischen Instrumente der Signalanalyse, da die auswertbare Signallänge zu kurz ist.
- 3. Rauschanregung und Resonanzanregung durch einen Schwinger lassen sich bei eingebetteten Rohren nicht ankopplern, ohne die Systemeigenschaften zu beeinflussen.

Zusammen mit den Ergebnissen der Messungen bei der Klangprüfung (Bild 1) ergab sich damit, daß die Arbeitshypothese 1, d.h. daß für ein bestimmtes Rohr ein festes Frequenzmuster existiert ,aufgegeben werden mußte zugunsten einer mehr weichen (fuzzy) Musterbildung und der sorgfältigen Analyse der Signale im Zeitbereich. Die Probleme der Ankopplung führten dazu, daß bei in-situ-Versuchen eine Beschränkung auf die Klopfanregung vorgenommen wurde.

## 2.2 Ultraschall

Anwendungen der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung zur Lokalisation von Schäden an Kanalrohren in situ sind nicht bekannt. Dagegen spielen Ultraschallverfahren bei der Prüfung von Pipelines (Gas oder Öl) eine herausragende Rolle. Hierzu zählen insbesondere die Riß- und Korrosionsprüfung, die Schweißnahtprüfung sowie in jüngster Zeit die Vermessung von elastischen Spannungen im Rohrmaterial.

Darüber hinaus ermöglicht die exakte Vermessung der Schallgeschwindigkeit und Schallschwächung eine Beurteilung der elastischen und der Gefügeeigenschaften (Korngrößenbestimmung) im untersuchten Material in hoher räumlicher Auflösung. Die dabei eingesetzten Prüfverfahren arbeiten überwiegend mit Frequenzen im oberen kHz (> 500) bzw. unteren MHz Bereich.(<2). Die Anwendung der Ultraschallprüfung im Hoch- und Tiefbau ist dagegen weit weniger entwickelt. Zwar ist die Prüfung von Betonteilen und der Zusammenhang zwischen Betonqualität und

Schallgeschwindigkeit seit langem bekannt, jedoch ist die Ultraschallprüfung als Element der Fertigungskontrolle sowie in der routinemäßigen Überwachung sicherheitsrelevanter Bauteile nur vereinzelt beschrieben. Hinzu kommt die i. a. komplexe Form von z.B. gegossenen Betonteilen, die zu einer ebenfalls komplexen Schallausbreitung und dadurch auch zu einer schwierigen Interpretation von Meßergebnissen führen.

Ein latentes Problem der US Prüfung stellt darüber hinaus die Modenwandlung, d.h. die Umwandlung von Dichtewellen in Schubwellen sowie die Erzeugung von Oberflächenwellen, dar. Diese kann allerdings ebenso zu Prüfung herangezogen werden. Zudem existieren Methoden der Signalanalyse sowie der speziellen Ankopplung der Wandler, die eine Identifikation bzw. Eliminierung der durch die Oberflächenwellen sowie durch sogenannte Multipath-Effekte hervorgerufenen Störsignale ermöglichen.

Aus den physikalischen Grundtatsachen folgt das Potential der Ultraschallmessung und damit ergeben sich folgende Arbeitshypothesen :

1. Die Schallgeschwindigkeit ist ein Maß für die elastischen Eigenschaften eines Körpers.
2. Die Schallschwächung charakterisiert die absorptiven und streuenden (räumliche Inhomogenität) Eigenschaften des untersuchten Materials. Insbesondere die Reflexion (d.h. der gerichtete, kohärente Streuanteil) tritt immer an Stellen großer akustischer Impedanzunterschiede auf, wie sie bei Rissen zu finden sind.
3. Durch die Messung der Laufzeit kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit eine Wegstrecke (z.B. Wandstärke eines Rohres) bestimmt werden.

Die Realisierung der physikalischen Lösungsansätze erfordert die schrittweise Annäherung an die realen Prüfbedingungen ausgehend von einem Laboraufbau. Daraus resultiert eine dreistufige Vorgehensweise:

1. Basierend auf den bisherigen Anwendungen von Ultraschall in der Betonprüfung wird in einem ersten Arbeitsschritt die Wellenausbreitung an einem Betonrohr in vitro untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist hierbei die technische Realisierung verschiedener Prüftechniken sowie die kritische Beurteilung der Umsetzbarkeit der verschiedenen Ansätze bei in-vivo-Anwendungen. Ferner müssen in dieser Arbeitsphase verschiedene Rohrmaterialien (Beton, Metall, Keramik, Asbestzement) auf ihre Prüfbarkeit untersucht und die jeweils geeignetste Prüfmethode bestimmt werden.

Im einzelnen bedarf es folgender Arbeiten:

- a) Entwurf und Bau eines Testkörpers mit definierten, den realen Verhältnissen möglichst ähnlichen Fehlern (Risse, korrodierte Zonen, Abplatzungen an der Außenwand) zur Simulation aller auftretenden Prüfaufgaben.
- b) Bau eines Prüfstandes zur Realisierung der verschiedenen Prüftechniken.
- c) Auswahl (evtl. Bau) spezieller, auf die jeweilige Prüftechnik abgestimmter Schallsensoren und Schallwandler.
- d) Aufbau einer computergestützten Auswerteelektronik für den Laboraufbau zur Datenerfassung, Datenspeicherung und -analyse.

Beendet wird der erste Arbeitsabschnitt durch die Bewertung der Resultate für die einzelnen Prüftechniken sowie durch die Bestimmung der erfolgversprechendsten Strategie. Unter Umständen bietet sich hierbei auch die Synthese aus mehreren Prüftechniken sowie die Nutzung unterschiedlicher Verfahren für unterschiedliche Rohrmaterialien an.

2. Die im Arbeitsschritt 1 ausgewählte Technologie wird in einem Prototypen realisiert, welcher erste in-situ-Untersuchungen ermöglicht. Hierbei werden neben physikalischen Bewertungskriterien auch Aspekte wie die technische Realisierbarkeit im industriellen Maßstab sowie wirtschaftliche Überlegungen in den Entscheidungsprozeß mit einbezogen. Weiterhin wird in diesem Arbeitsschritt 2 eine Konzeption zur Dokumentation der Meßdaten für den Anwender erstellt.
3. Ziel des dritten Arbeitsabschnittes ist es, erste Erfahrungen über die Leistungsfähigkeit des Systems unter realistischen Betriebsbedingungen zu erhalten, diese in Modifikationen des Prototyps einfließen zu lassen und die Umsetzung in die industrielle Fertigung durchzuführen.

### 3. Rißdetektion

#### 3.1 Mit Schallreflexionsanalyse

Eine direkte Analyse im Zeitbereich ergibt sich bei symmetrischer Anordnung der Meß- und Schlaggeräte. Beim intakten Rohr aus homogenem Material mit kreisförmigem Querschnitt sollte bei zwei Aufnehmern, die symmetrisch zur Schlageinleitung positioniert sind, zur gleichen Zeit exakt das gleiche Signal auftreten.

Besteht ein durchgehender Riß, so zeigt sich dies in den Signalen anhand der verschiedenen Ankunftszeiten (Bild 2), da die durch den Hammer eingetragene Welle bis zum Aufnehmer auf der anderen Seite des Risses einen längeren Weg zurücklegen muß. Es ergibt sich so eine eindeutige Bestimmung durchgehender Risse.

Mit den Vorarbeiten aus der automatischen Interpretation der Frequenzanalysen, insbesondere einem Peak-Picker-Algorithmus, läßt sich diese Untersuchung der Zeitsignale und Bestimmung der Differenz von Ankunftszeiten automatisieren.

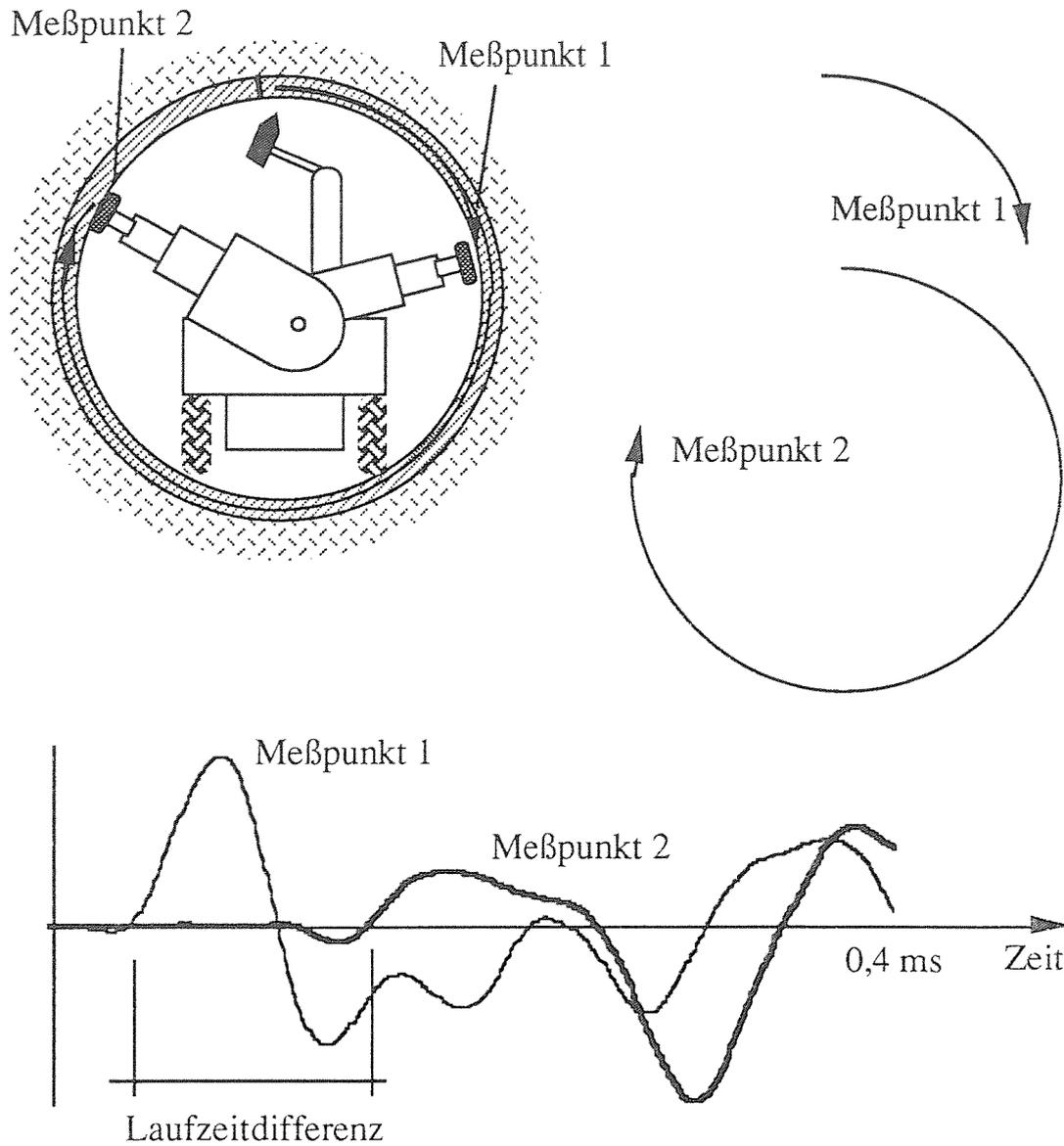


Bild 2 : Rißdetektion im Zeitbereich mit Schallreflexionsanalyse

### 3.2 Mit Ultraschall

Die Prüfung von Kanalrohren auf Risse erfolgt durch zwei Schallwandler, die auf der Innenseite der Rohrwand aufgesetzt werden und mittels einer Positioniereinheit beliebig verfahren werden können, wie in Bild 3 schematisch dargestellt.

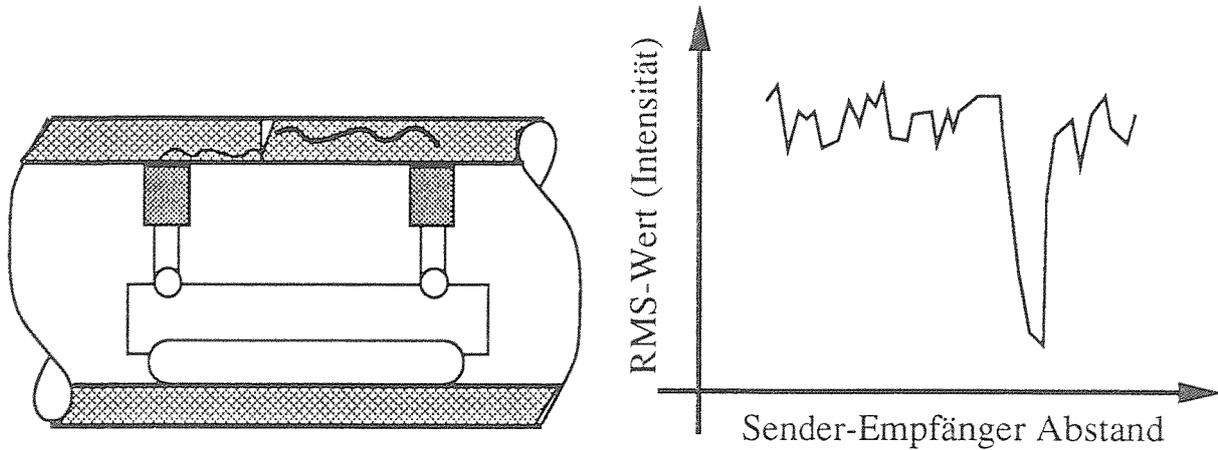


Bild 3 : Rißdetektion mit Ultraschalltechnik

In dieser Anordnung wird ein Wandler als Sender und der zweite Wandler als Empfänger genutzt. Bei intakter Strecke besteht eine gute akustische Verbindung zwischen Sender und Empfänger über die Kanalwand, so daß sich beim Empfänger nach einer vom Abstand der beiden Wandler abhängigen Laufzeit ein relativ hoher Signalpegel einstellt. Verläuft zwischen den beiden Wandlern ein Riß, so ist die Übertragungsstrecke praktisch unterbrochen, und auf der Empfangsseite kann das Signal nicht mehr oder nur stark vermindert detektiert werden.

Dieser relativ einfachen Methode stehen einige Probleme entgegen, die zu lösen waren, bevor das Verfahren einsetzbar wurde. Zunächst werden bei der akustischen Anregung eines Kanalrohres verschiedene Typen von Schallwellen angeregt, longitudinale Dichtewellen, transversale Scherwellen, sich nur an der Oberfläche ausbreitende Rayleigh-Wellen und in der Oberfläche laufende Kriechwellen. Diese breiten sich alle mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus und wandeln sich teilweise an akustischen Grenzflächen ineinander um. Dadurch entsteht eine Informationsvielfalt, die die Interpretation des Meßergebnisses erschwert. Durch eine geeignete Wahl der Anregung, Wandlergeometrie, Einschallwinkel und Abstand sowie durch eine entsprechende Signalverarbeitung unter Ausnutzung von Simulationsberechnungen und Methoden der Systemidentifikation läßt sich die Methode optimieren und zu einem zuverlässigen Verfahren gestalten.

#### 4. Muffen

Auf ähnliche Weise wie die Rißprüfung arbeiten die Verfahren zur Muffendichtigkeitsprüfung. Hierzu werden die Schallwandler Sender und Empfänger bei der Ultraschalltechnik, bzw. Schlag und Beschleunigungsaufnehmer bei der Schallreflexionsanalyse, am Rohrübergang positioniert. Bei intakter Muffe kann die Schallwelle über die Dichtung von einem Rohr zum anderen übertragen werden. Bei undichter Muffe, insbesondere aber beim Vorhandensein von Luftspalten, ist der akustische Kontakt unterbrochen und der Ultraschall- oder Klopfimpuls kann nicht auf dem direkten Verbindungsweg, sondern nur auf Umwegen vom Sender zum Empfänger gelangen. Durch Verschieben der Meßanordnung auf dem Rohrumfang kann das Ausmaß bzw. der Ort der Undichtigkeit exakt lokalisiert werden.

#### 5. Untersuchung der Bettung

##### 5.1 Mit Schallreflexionsanalyse

Um festzustellen, inwieweit sich die charakteristischen Frequenzbilder der Rohre auch bei einer Einbettung reproduzieren lassen, wurden hierzu Steinzeugrohre in eine mit Sand gefüllte, stehende Tonne eingestellt. Durch den Einbau einer Aussteifung konnte auch eine teilweise reduzierte Bettung simuliert werden (siehe Bild 4).

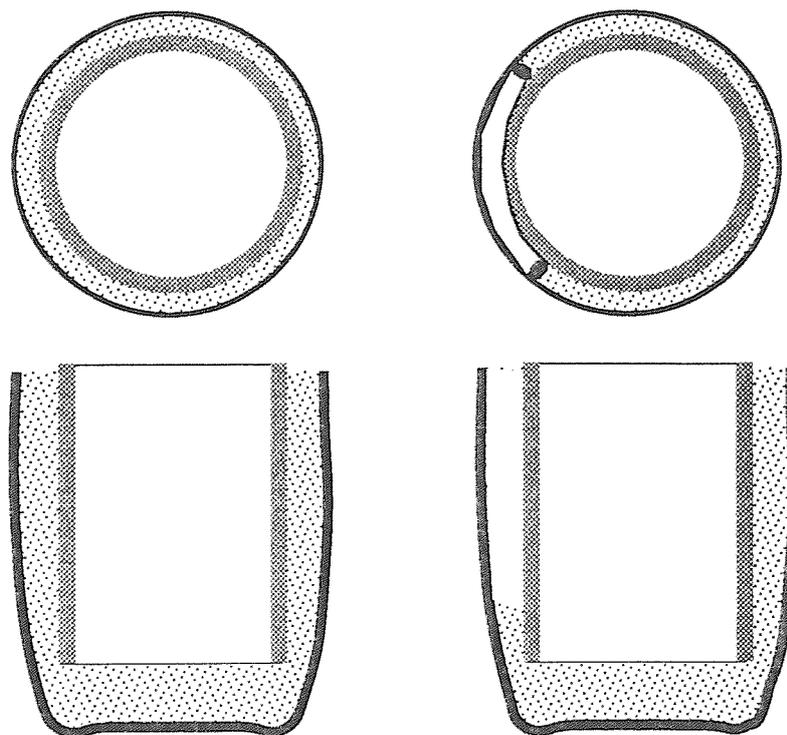


Bild 4 : Versuchsaufbau für eingebettete Rohre im Labor

Bei den Schwingungsmessungen zeigte sich die Wirkung der Bettung sehr deutlich. Gegenüber dem frei schwingenden Rohr sind die Schwingungen des gebetteten Rohres sehr stark gedämpft. Die Schwingungen des teilgebetteten Rohres liegen dementsprechend zwischen beiden (Bild 5).

Da die starke Dämpfung durch die Bettung dazu führt, daß sich die Schwingungen bei Schlaganregung nicht so lange reproduzieren, wird auch die Darstellung der Frequenzanalyse beeinflusst. Bei den stark gedämpften Signalen des eingebetteten Rohres haben die maßgeblichen Frequenzen nicht so eine ausgeprägte Spitze wie bei den schwach gedämpften Signalen des frei schwingenden Rohres (Bild 6).

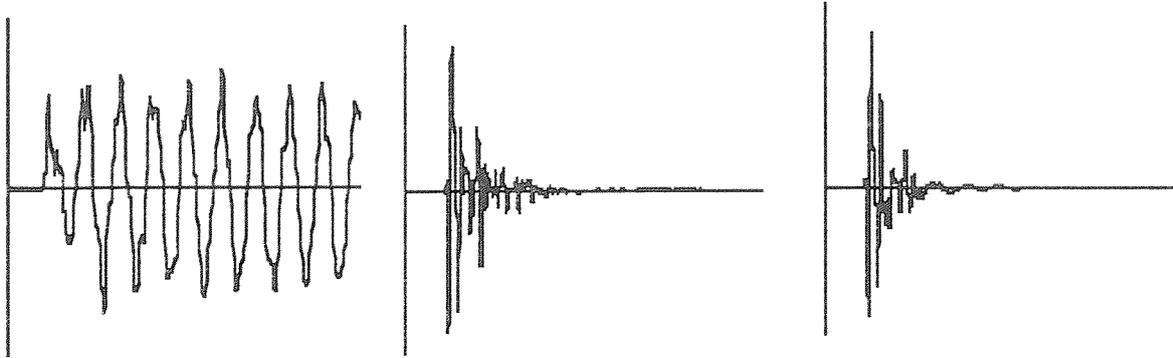


Bild 5 : Frei schwingendes, teilweise gebettetes und vollständig eingebettetes Rohr  
Zeitverläufe über 16 ms

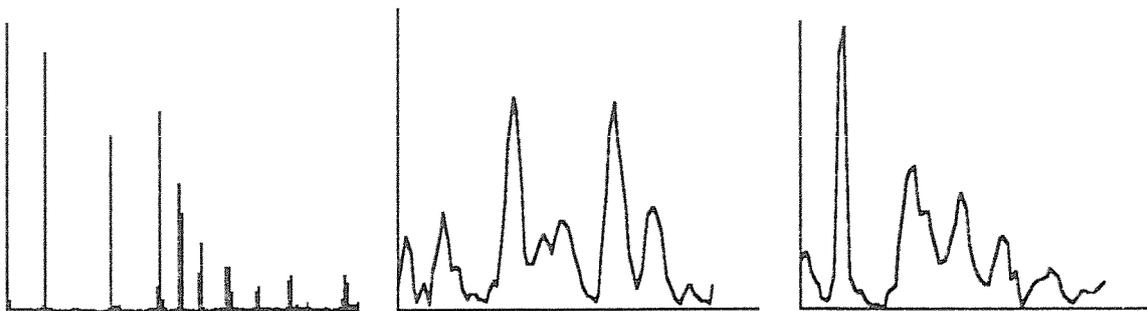


Bild 6 : Frei schwingendes, teilweise gebettetes und vollständig eingebettetes Rohr  
- Frequenzbilder für den Bereich 0 - 5000 Hz

Aus der Frequenzanalyse ist auch zu ersehen, daß die Bettung eine versteifende Wirkung des Systems hat, denn die Eigenfrequenzen der gebetteten Rohre steigen bei dem Versuchsaufbau im Labor um den Faktor 1,2 für den Vergleich frei schwingendes und vollständig eingebettetes Rohr.

## 5.2 Mit Ultraschall

Das von der Außenwand reflektierte Echo ist in seiner Amplitude abhängig vom Übergang Rohr - Bettungsmaterial. Hierbei ist entscheidend der akustische Impedanzunterschied in den beiden Materialien. Ein guter akustischer Kontakt führt zu einer kleineren Echoamplitude verglichen mit einem schlechten akustischen Kontakt. Voruntersuchungen im Labor haben gezeigt, daß Hohlräume von einer Sandbettung differenziert werden können. Wie bereits bei der Schallreflexionsanalyse erwähnt, bestimmt die Bettung die Randbedingungen der Rohrschwingungsmoden. Es besteht deshalb durchaus die Möglichkeit, auch die modalen Ultraschallanalysen zur Beurteilung der Bettung heranzuziehen. Diese Untersuchungen können nicht im Labor, sondern nur an geeigneten Teststrecken erfolgen.

## 6. Untersuchung der Restwandstärke mit Ultraschall

Weiterhin kann mittels Ultraschall die an einer Stelle (noch) vorhandene Rohrwandstärke gemessen werden. Dabei wird ebenfalls ein kurzes Schallsignal von der Rohrinneinnenseite an die Wand emittiert. Das von der Rückseite (Rohraußenseite) reflektierte Schallsignal wird nach der doppelten Laufzeit von einem zweiten an der Innenwand befindlichen Empfänger registriert. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit des Materials ergibt sich aus der Laufzeit direkt die Wandstärke. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwellen größer ist als die aller anderen Wellen, kann davon ausgegangen werden, daß das erste eintreffende Echo nach Abschluß der Impulseinleitung das Rückwandecho ist. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit unbekannt, so kann sie durch eine Messung auf der Innenseite bestimmt werden (siehe Bild 7).

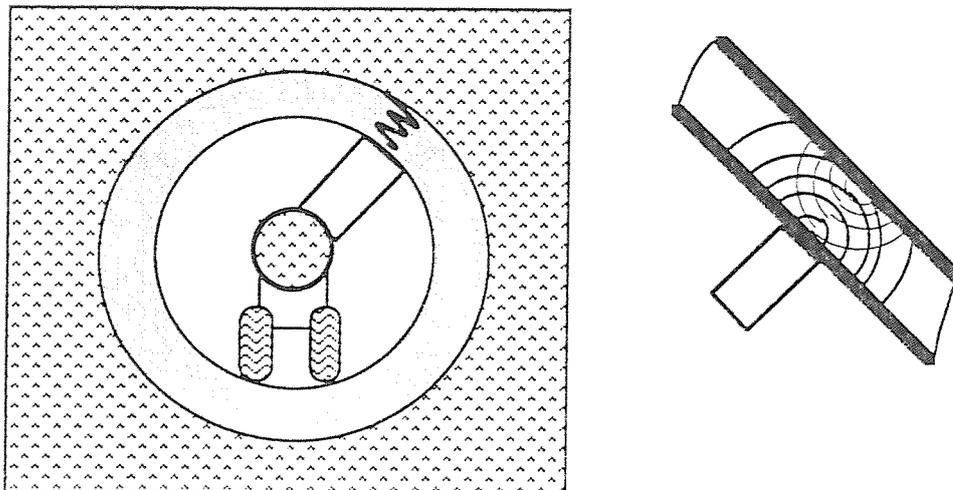


Bild 7 : Bestimmung der Wandstärke mit Ultraschall

## 7. Geräte-Prototypen für in-situ-Messungen

Da sich der tatsächliche Zustand von Rohren, die Bettung und auch die charakteristischen Schadensbilder im Labor nur mit sehr großem Aufwand und trotzdem meist nur unvollkommen realisieren lassen, waren nach den ersten erfolgreichen Messungen im Labor, d.h. nach dem Passieren der ersten Meilensteine sofort Konzepte entworfen worden, die Meßtechnik auf fahrbare und ferngesteuerte Geräte zu installieren. Mit diesen Geräten können dann Untersuchungen in situ durchgeführt werden.

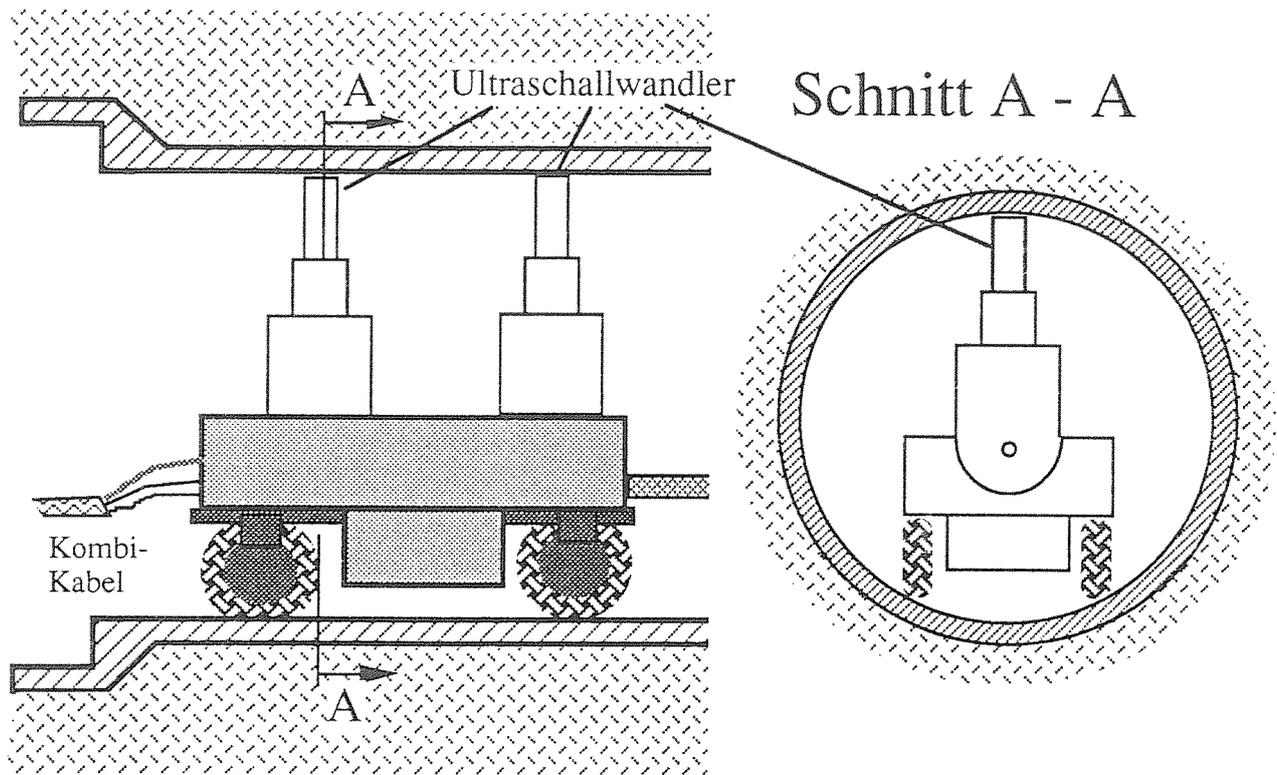


Bild 8 : Prototyp für Ultraschallmessungen im Kanal

Bei der Ultraschalltechnik wurden entsprechend dem Sender-Empfänger-Konzept zwei Wandler in der Längsachse des Rohres versetzt angeordnet. Mit Blick auf die lokale Prüfung wurde eine beliebige Positionierbarkeit in Umfangsrichtung vorgesehen.

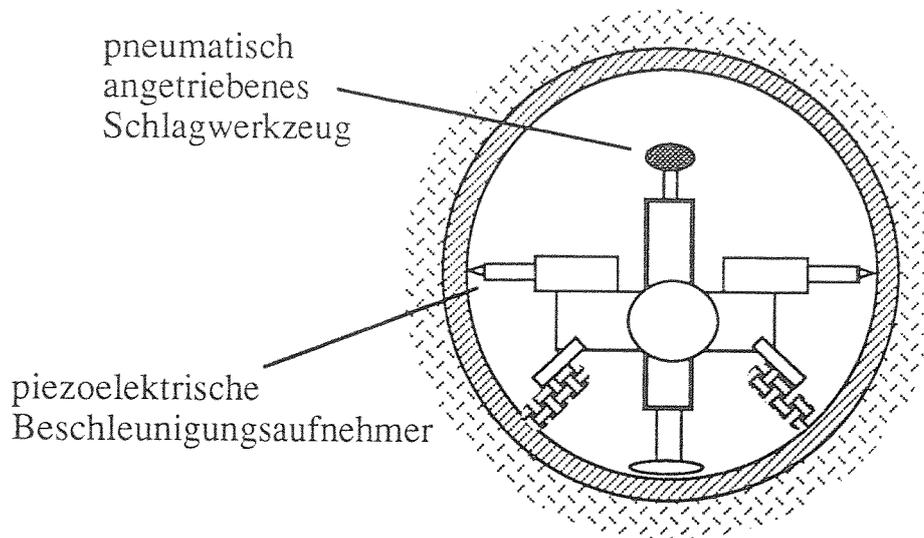


Bild 9 : Prototyp für Schallreflexionsanalysen im Kanal

Obwohl auch für die Schallreflexionsanalyse eine beliebige Positionierbarkeit erstrebenswert ist, wurde mit Blick auf den integralen Charakter der Schwingungsmessungen, beim ersten Prototyp eine starre Anordnung gewählt. Der pneumatisch angetriebene Hammer ist in seiner Schlagrichtung senkrecht zur Richtung der Beschleunigungsaufnehmer angeordnet. Dadurch wird gewährleistet, daß die vertikalen Bewegungen des Wagens nicht als Rohrbewegungen aufgenommen werden.

Für die ersten prototypischen Einsätze wurden beide Geräte von Hand gezogen. Eine angekoppelte Kanalkamera mit Schwenkkopf ermöglichte dabei die Positionierung und Kontrolle der Positionierung von Schlaggerät, bzw. Sender und Empfänger im Kanal.

## 8. Das Kanaldemonstrationszentrum in Burbach

Für erste Tests erschien der Einsatz in in Betrieb befindlichen Kanälen nicht sinnvoll, da die Prototypen noch nicht vollständig elektrisch abgeschirmt wurden, um jederzeit Zugang zu einzelnen Teilen zu haben.

Für das Sammeln von Erfahrungen mit der Handhabung wurden für den Einsatz der Schallreflexionsanalyse eine Testhaltung für die Kanalsanierung auf dem Gelände der Zentralen Reparaturwerkstatt der Bilfinger+Berger Bauaktiengesellschaft und neuerlegte Steinzeughaltungen in Neubaugebieten im Planungsstadium vom Tiefbauamt der Stadt Mannheim zur Verfügung gestellt. Es zeigte sich nach der Beseitigung einiger Schwierigkeiten, insbesondere Verhinderung der Kippbewegungen des vierrädrigen Wagens, daß die Erzeugung von reproduzierbaren Rohrmustern sowie die Rißerkennung (in der Testhaltung Sanierung) möglich war.

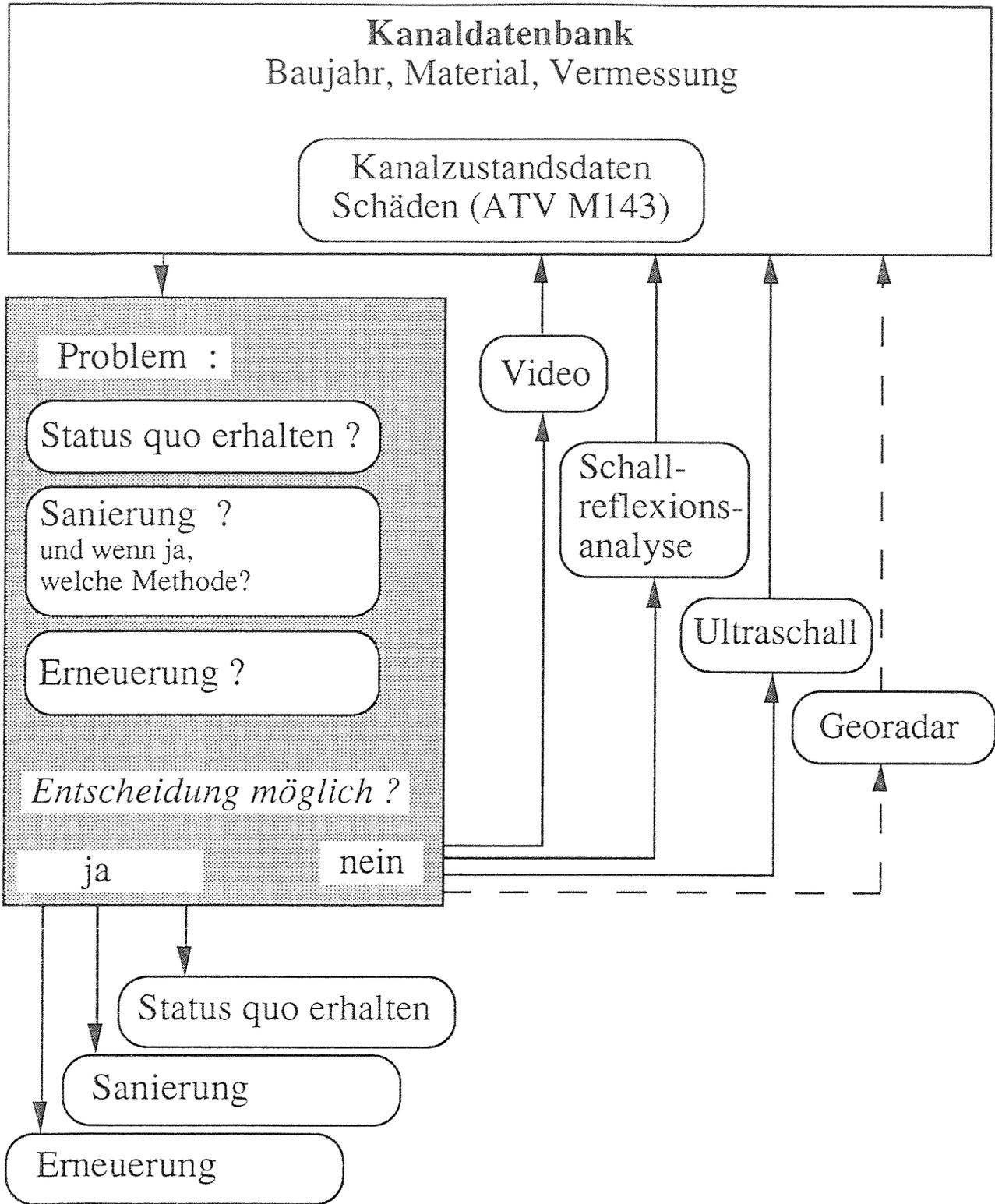


Bild 11 : Entscheidungssituation für Kanäle und Datenfluß/Datenhaltung

Die Situation der Diagnose wird durch Bild 11 veranschaulicht. Ziel ist, durch die Kanalinspektion eine Entscheidungsgrundlage für Maßnahmen zu schaffen. Reichen die Ergebnisse des eines Inspektionsverfahrens nicht aus, müssen andere Inspektionsmethoden zusätzliche Informationen

Für die Ultraschallprüfung wurde von Fa. Sehn eine Anzahl Betonrohre zur Verfügung gestellt, die zu einer oberirdischen Testhaltung für die Ultraschallprüfung zusammengebaut werden konnten.

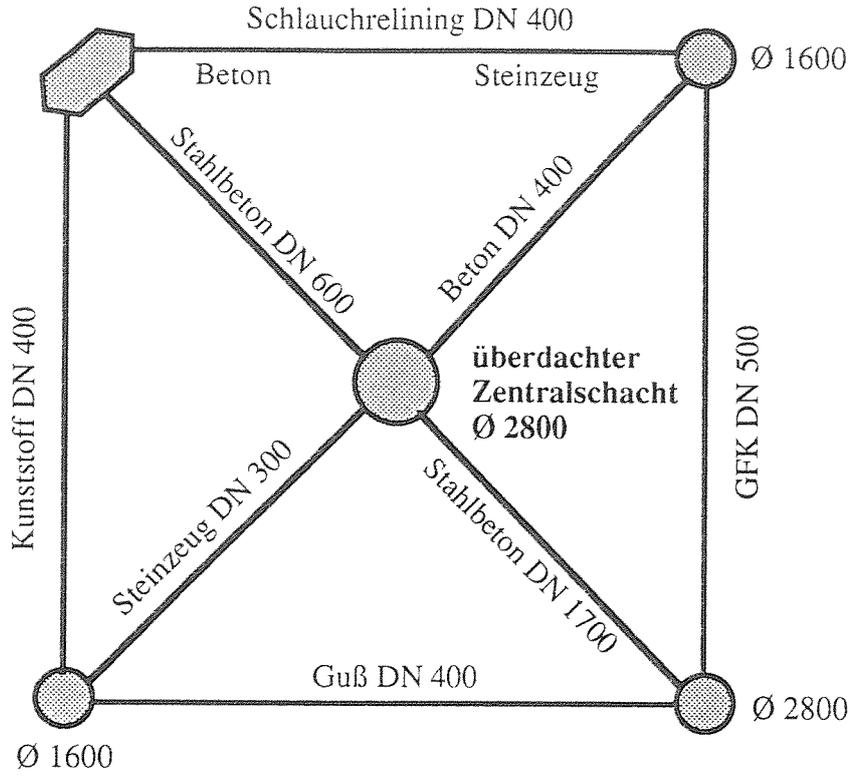


Bild 10 : Demonstrationszentrum Kanalrohr in Burbach

Um vor der Ertüchtigung der Geräte für den Einsatz in in Betrieb befindlichen Kanälen Erfahrungen mit der Fehlerdetektion zu erwerben, wurde vom Abwasserverband Saar, als Projektleiter des Verbundprojektes, ein Kanaldemonstrationszentrum geplant und gebaut, in welchem verschiedene Kanalbauarten und Werkstoffe mit jeweils spezifischen Schadensbildern untersucht werden können (siehe Bild 10). Dieses Demonstrationszentrum ist so ausgelegt, daß nicht nur die im Verbundprojekt beteiligten Partner die neu entwickelten akustischen Detektionsmethoden erproben können, sondern auch andere Entwicklungen der Detektion oder auch der Sanierungsverfahren eingesetzt werden können.

9. Einbindung der Ergebnisse in eine Kanaldatenbank und Verbesserung der Schadensklassifikation.

Die bisher nicht erfaßbaren Schadensbilder werden in ein Klassifizierungssystem eingebunden und zusammen mit optischen Schadensbildern einer Datenbank zugeordnet. Auf Basis dieser Information erfolgt die Bewertung/Ableitung von Sanierungsprioritäten und eine Untersuchung der Möglichkeiten einer Prognose von Schadensverläufen im Rahmen bereits bestehender Alterungsmodelle unter Ausnutzung der neuen Verfahren.

liefern. Natürlich sollen die Kosten für die Beschaffung der zusätzlichen Information in einem gesunden Verhältnis zur Verbesserung der Entscheidungssicherheit stehen.

Durch Bild 11 ist die derzeitige Praxis wiedergegeben, in der die Videoinspektion die Hauptrolle spielt. Mit dem Einsatz neuer Verfahren kann jedoch auch eine Verschiebung der Reihenfolge hin zu dem Verfahren entstehen, welches mit dem geringsten Aufwand die beste Basisinformation liefert.

Zusätzlich zu dem vorstehend erläuterten Entscheidungsproblem zeigt sich für die neuen Inspektionsmethoden aber auch ein Einsatz für Routineuntersuchungen gemäß der Eigenkontrollverordnung. Da das jeweilige Meßergebnis in sehr konzentrierter Form darstellbar ist, sich der Meßablauf standardisieren und damit reproduzieren läßt, ist die Auswertung auch einem Mustervergleich durch den Computer zugänglich. Die in mehrjährigem Turnus durchzuführenden Kontrollen lassen sich über den Zustandsvergleich damit weitgehend automatisieren. Damit können Kosten gespart werden ohne die Qualität zu senken.

#### Danksagung

Die Autoren bedanken sich  
bei Herrn Prof. Eberle und Herrn Dipl.-Ing.Fuhrmann, Projektträgerschaft Wassertechnologie und Schlammbehandlung am Kernforschungszentrum Karlsruhe, für die fachliche Betreuung und vor allem für Ihre Mitwirkung beim Zustandekommen des Projektes als Verbundprojekt aus beantragten, sich ergänzenden Einzelprojekten,  
bei Frau Dipl.Verw.W. S. Vollmer für die verständnisvolle administrative Unterstützung,  
bei den vielen Mitarbeiter in den genannten Partner-Institutionen, die zum Gelingen des Projektes beitragen, vor allem  
bei Herrn Drescher, Abwasserverband Saar, Gesamtprojektleiter,  
bei Herrn J.Steck, R.Wichard, K.Bourgeois, P.Krause-Wichmann, D.Ohligschläger, FhG-IBMT,  
bei Herrn Dipl.-Ing.(BA) J. Wolf von der GSP,  
bei Herrn Dr.Kirsch und Herrn Dipl.-Ing.Herold, Hydac Technology GmbH, Bereich Vorentwicklung,  
bei Herrn Dr.Geis, GWK