

Bild 1: Inspektionsprotokoll der Kanalhaltung mit der Kanalnummer 23505 einer Inspektion vom 09.09.1999

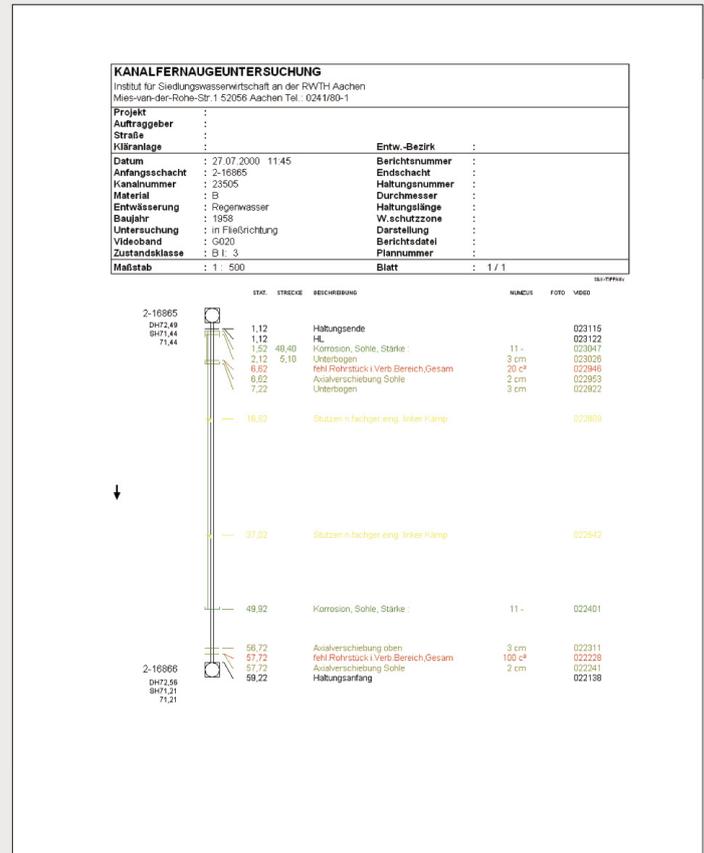


Bild 2: Inspektionsprotokoll der Kanalhaltung mit der Kanalnummer 23505 einer Inspektion vom 27.07.2000

Forschungsprojekt Bilderkennung

Ergebnisse der ersten Projektphase

Die Entwicklung von Bilderkennungsverfahren zur Qualitätssicherung bei der Zustandserfassung von Kanalisationen ist Gegenstand eines Forschungsprojektes. Die ersten Ergebnisse liefern bereits eine hohe Qualität in der Erkennung.

**VON KARSTEN MÜLLER,
BENEDIKT FISCHER, THOMAS LEHMANN,
AACHEN,
WERNER HUNGER, KIEL,
THOMAS SCHÄFER, BRAUNSCHWEIG**

Die Inspektion, also die Feststellung und Beurteilung des Istzustandes von Kanalhaltungen erfolgt gem. DIN EN 752-5 durch

- hydraulische Untersuchungen zur Erfassung der Leistungsfähigkeit eines Teils oder der Gesamtheit eines Entwässerungssystems,
 - umweltrelevante Untersuchungen zur Ermittlung der Auswirkungen von Entlastungen oder Exfiltrationen auf Gewässer oder Boden sowie
 - bauliche Untersuchungen.
- Die baulichen Untersuchungen erfolgen ge-

wöhnlich qualitativ mit Hilfe optischer Verfahren (TV-Inspektion). Wesentlicher Grund dafür ist, dass mit vergleichsweise geringem Kostenaufwand bereits detaillierte Erkenntnisse über den Zustand der größtenteils nicht begehbaren Kanalhaltungen gewonnen werden können. Auf diese Weise können Aussagen über die Lage und Ausprägung verschiedenster Schadensbilder getroffen werden. Hinzu kommt, dass Geometrie, Rohrmaterial und Ausführung, Lage sowie Zustand von Anschlüssen erfasst werden können.

Hierin begründet es sich u. a., dass die optische Inspektion in den meisten EKVO als Verfahren zur Zustandserfassung verbindlich vorgegeben wird und mittlerweile ein Inspektionsgrad der öffentlichen deutschen Abwas-

serkanäle von etwa 75 % vorliegt (Berger et al., 2002). Mittelfristig ist zwar eine Veränderung des derzeit durchschnittlichen Inspektionsturnus von 10 auf etwa 15 Jahre zu erwarten (Berger et al., 2002). Aber auch dann liegen die bundesweiten Kosten für die optische Zustandserfassung lt. groben Schätzungen des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung zukünftig zwischen 16 bis 60 Mio. €/a (BBR). Hinzu kommen die nicht quantifizierten Kosten für die Zustandsbewertung.

Damit ist die optische Zustandserfassung der Kanalhaltungen wesentliche Grundlage für die Sanierungsstrategieentwicklung und Sanierungsplanung. Fehler, die bei der Inspektion und Schadensbeschreibung gemacht werden und zu einer Fehlbeurteilung des Zustandes einer Kanalhaltung führen, pflanzen sich bei einer Sanierungsstrategieentwicklung und Sanierungsplanung fort.

Untersuchungen, die eine Ursachenermittlung und Quantifizierung solcher Fehler zum Ziel hatten, zeigen, dass Fehleinschätzungen i.d.R. nicht auf eine unzureichende Technik, sondern im Wesentlichen auf eine im betrieblichen Alltag oft unzureichende Qualität der Durchführung zurückzuführen sind. Ebenfalls konnte durch die genannten Untersuchungen dargestellt werden, dass diese Fehleinschätzungen erheblich sein können.

Um diese Fehleinschätzungen zu minimieren

wird im Rahmen des Forschungsvorhabens „Entwicklung und Erprobung eines digitalen Bilderkennungs- und Bildverarbeitungsverfahrens zur objektiven Zustandserfassung von Kanalisationen“ (gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, DBU) das Ziel verfolgt, die Zustandsbeschreibung durch Bilderkennungsverfahren zu unterstützen und damit zu objektivieren.

Der Artikel beschreibt den Hintergrund des Projektes, die Aufgabenverteilung zwischen den Kooperationspartnern und die Ergebnisse der ersten Projektphase.

Erfassbarkeit von Schadensbildern

Die Erfassbarkeit von Schadensbildern und damit die Qualität der Zustandserfassung wird zum Ersten bestimmt durch die Möglichkeiten und Grenzen der verwendeten Kamera-, Archivierungs- sowie Visualisierungstechnik (z. B. Beleuchtung, Bildauflösung und -schärfe oder Blickwinkel). Zum Zweiten wird die Qualität der Zustandserfassung dadurch beeinflusst, ob bzw. in welchem Maße die Systeme fehlerhaft bzw. nicht sachgerecht bedient werden (z. B. durch ungenügende Fokussierung bei der Inspektion). Grundsätzlich kann eine mangelhafte Inspektionsqualität dazu führen, dass

- zustandsrelevante Schäden oder sonstige Auffälligkeiten, welche die ordnungsgemäße Funktion des Kanals beeinflussen,

übersehen werden,

- Kanalhaltungen unvollständig erfasst werden und
- Schäden bzw. deren Dimension mit wechselnden oder nicht normierten Angaben beschrieben werden.

Beispielhaft wird diese Problematik durch die im Folgenden dargestellten Inspektionsprotokolle der Befahrung einer Kanalhaltung durch unterschiedliche Fernaugenführer (Bild 1 und Bild 2) aufgezeigt.

Die Auswirkungen der beiden sich gegenseitig bedingenden und ggf. auch verstärkenden grundsätzlichen Fehlerquellen auf die Qualität der Protokollierung und der darauf aufbauenden Klassifizierung des Zustandes einer Kanalhaltung, konnten am Rande des Forschungsvorhabens „Entwicklung eines allgemein anwendbaren Verfahrens zur selektiven Erstinspektion von Abwasserkanälen und Anschlussleitungen (Müller und Dohmann, 2002) für konventionelle Dreh-Schwenkkopf-Kameras abgeschätzt werden (Hübner, 2002; Müller, 2004). Grundlage für die nachfolgend dargestellten Ergebnisse sind die Protokolle der TV-Inspektionen von insgesamt 307 Kanalhaltungen eines kommunalen Kanalnetzbetreibers, die jeweils innerhalb eines Zeitraumes von weniger als drei Jahren wiederholt inspiziert wurden. Der Mittelwert der Inspektionsintervalle lag bei

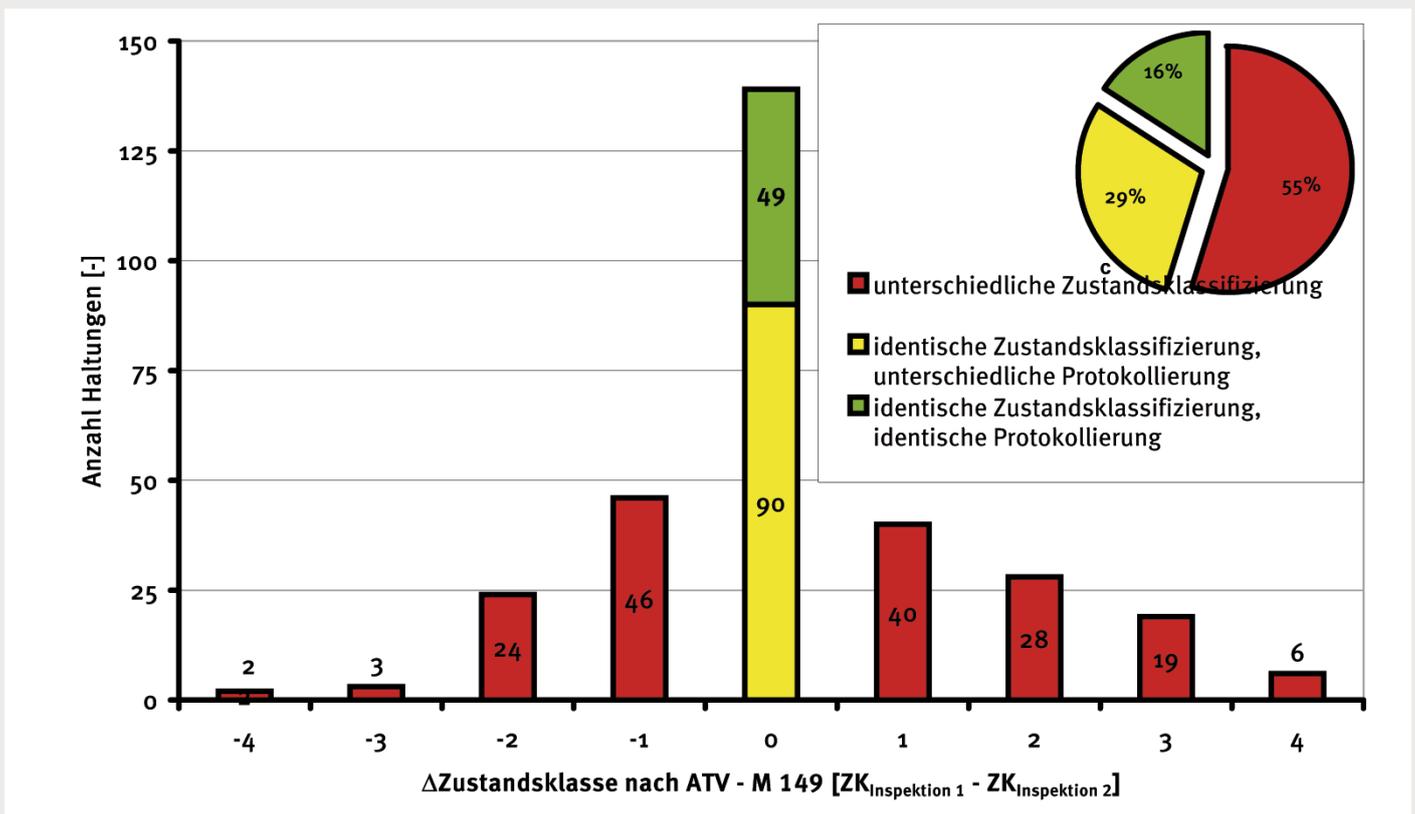


Bild 3: Zustandsklassendifferenzen von 307 doppelt inspizierten Kanalhaltungen (Müller, 2004)

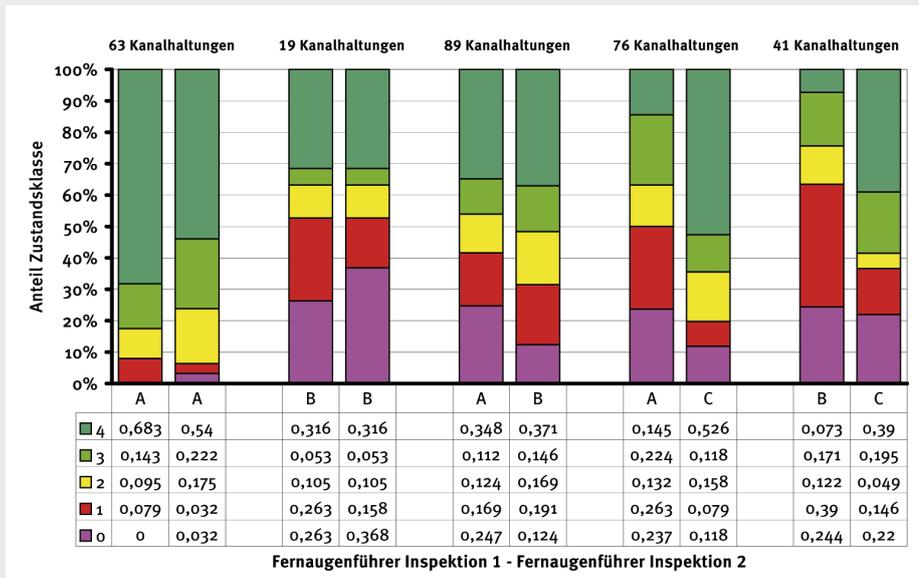


Bild 4: Gegenüberstellung jeweils doppelt erfasster Kanalhaltungen: Abhängigkeit der über das Inspektionsprotokoll ermittelten Zustandsklassenverteilung vom Fernaugenführer

etwa 14 Monaten. Es kann daher für den Regelfall ausgeschlossen werden, dass die Unterschiede in den Protokollierungen der jeweiligen Kanalinspektionen auf Alterungs- bzw. Abnutzungsprozesse zurückzuführen sind. Die Zustandsklassifizierung der Haltungen erfolgte nach ATV-M 149: Haltungen, die in die Zustandsklasse (ZK) 0 eingeordnet wurden, gelten hinsichtlich der baulich bedingten Sanierungsdringlichkeit als Sofortmaßnahme, während Haltungen mit der Zustandsklasse 4 schadensfrei sind.

In Bild 3 ist die Verteilung der Differenzen der jeweils aus erster und zweiter Inspektion bzw. Protokollierung resultierenden Zustandsklassifizierungen der jeweiligen Kanalhaltungen dargestellt. Im Idealfall sollte diese Differenz nahe Null liegen und im Mittel aufgrund einer zwischenzeitlich ggf. eingetretenen Zustandsverschlechterung leicht negativ sein. Über 50 % der betrachteten Kanalhaltungen wur-

den bei den beiden Inspektionen jedoch nicht in die gleiche Zustandsklasse eingestuft, so dass die Differenzen der Zustandsklassen entsprechend positive bzw. negative Werte annehmen. Selbst bei den gleich klassifizierten Kanalhaltungen beruht dieses Ergebnis nur zu etwa einem Drittel (49 Kanalhaltungen) auf identischer Zustandsbeschreibung von Haltungen, die zudem im Wesentlichen schadensfrei waren. Die übrigen 90 Kanalhaltungen wurden zwar in die gleiche Zustandsklasse eingestuft, die Zustandsprotokollierungen wiesen aber z. T. erhebliche Unterschiede auf.

Unterstellt man dieser Streuung eine Normalverteilung, so ergibt sich für die Differenz der Zustandsklassifizierung eine Standardabweichung von $s = 1,34$ ZK. Unter der Annahme, dass diese Inspektionen repräsentativ sind, liegt damit die Differenz der für eine Haltung bei zwei Inspektionen ermittelten Zustandsklassen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 %

in einem Konfidenzintervall von etwa $-2,6 \leq \Delta ZK \leq +2,6$. Dies stellt bei einem fünfstufigen Klassifizierungsverfahren eine erhebliche Streuung dar.

Wie weitergehende Analysen der Protokolle zeigen, ist die ermittelte Streuung nicht auf bestimmte ggf. schwer zu erkennende Schadensbilder wie z. B. leichte Lageabweichungen beschränkt. Vielmehr werden mit Ausnahme nicht mängelfreier Stützen und Anschlüsse, die mit vergleichsweise hohen Übereinstimmungsgrad erfasst werden können, alle Schadensbilder in gleicher Größenordnung fehlerhaft erfasst (Hüben, 2002).

Die Abhängigkeit der Zustandsbeschreibung vom Fernaugenführer ist in Bild 4 durch die Gegenüberstellung der Zustandsklassenverteilungen dargestellt, die sich aus den Protokollen der jeweils doppelt inspizierten Kanalhaltungen ergeben. So ist der ermittelte Anteil der aus baulichen Gründen sofort bzw. kurzfristig zu sanierenden Kanalhaltungen bei Fernaugenführer C deutlich am geringsten und bei Fernaugenführer A am höchsten. Selbst bei Gegenüberstellung der Ergebnisse der Inspektionen durch ein und dieselbe Person zeigen sich z.T. deutliche Abweichungen in der Protokollierung der Kanalhaltungen. Obwohl die Datenbasis dieser Betrachtung nicht repräsentativ ist, wird aus diesen Betrachtungen doch deutlich, dass mit der konventionellen Inspektion aufgrund der erheblichen Abhängigkeit der Ergebnisse vom Fernaugenführer der Zustand einer Kanalhaltung in aller Regel nicht objektiv und damit nicht eindeutig und sicher erfasst wird.

Sofern bei der Überprüfung der Protokolle bzw. der Videodateien durch einen Ingenieur festgestellt wird, dass die Inspektion nicht mängelfrei ist, ist eine wiederholte Inspektion der betreffenden Kanalhaltung mit entsprechendem finanziellen und organisatorischen Aufwand erforderlich, um den Schaden neu zu verfilmen. Werden diese Mängel nicht festgestellt,

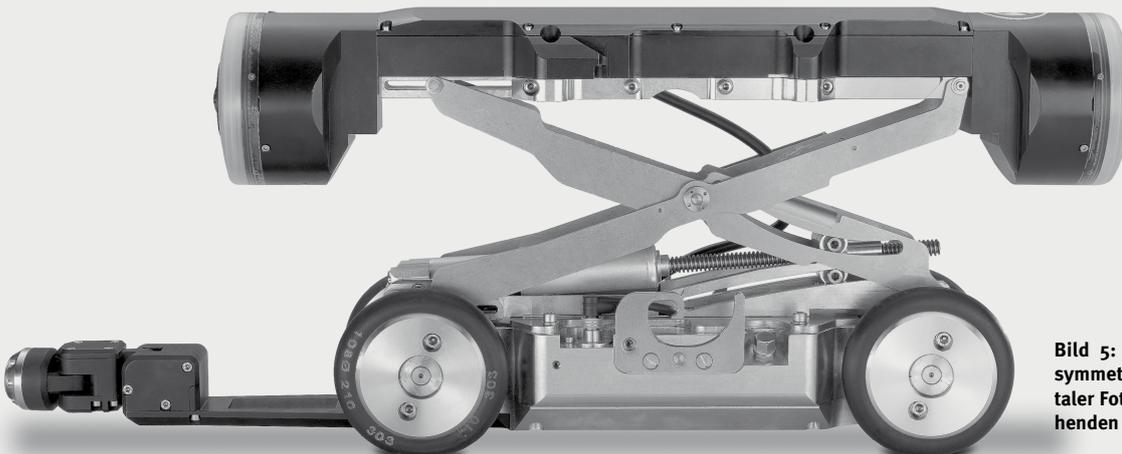


Bild 5: Panorama-Inspektionssystem mit 2 symmetrisch angeordneten, jeweils aus digitaler Fotokamera und Blitzbeleuchtung bestehenden Aufnahmeeinheiten

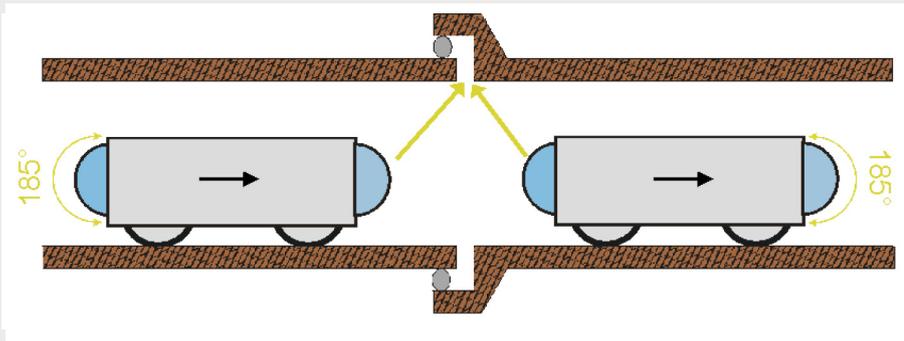


Bild 6: Erfassung einer Muffe durch das Panorama-Inspektionsverfahren, dargestellt durch zwei verschiedene Positionen im Kanalrohr

sind die Folge fehlerbehaftete Sanierungsstrategieentwicklungen und Sanierungsplanungen.

Geht man davon aus, dass jährlich 5 % der deutschen Kanalnetzlänge hinsichtlich ihres Zustandes erfasst werden, entspricht dies einer Gesamtlänge von etwa 22.500 km jährlicher Inspektionsleistung. Die spezifischen Kosten für Inspektion und erforderlicher vorheriger Reinigung können mit etwa 1.600 €/km bis 4.000 €/km (Müller und Dohmann, 2002) beziffert werden. Die durch die bundesdeutschen Kanalnetzbetreiber aufzubringenden Gesamtinspektionskosten liegen bei diesem Ansatz somit zwischen 36 - 90 Mio. € / a.

Schätzt man weiterhin den Anteil fehlerhafter durchgeführter Inspektionen in Anlehnung an das Kreisdiagramm in Bild 3 mit etwa 50 % ab, so ergeben sich jährliche Fehlinvestitionen von 18 - 45 Mio. €.

Diese Betrachtung schließt weder die durch fehlerbehaftete Sanierungsplanung erzeugten Folgekosten noch nicht monetär bezifferbare ökologisch relevante Aspekte (z. B. Ressourcenverbrauch durch fehlerhafte Sanierungsplanungen oder das Nichtsanieren schadhafter und ggf. abwassererfiltrierender Kanalhaltungen aufgrund fehlerbehafteter Zustandsbeschreibung) ein.

Digitale Bilderkennung von Schadensbildern

Projektverbund

Ziel des Vorhabens ist, nicht nur auf theoretischer Ebene die Bilderkennungsalgorithmen zur Zustandsbeschreibung von Kanalhaltung zu entwickeln, sondern diese unmittelbar in ein bestehendes Kamerasystem nebst Softwareumgebung einzubinden und hinsichtlich der Bedürfnisse des zukünftigen Anwenders zu gestalten. Um dies zu gewährleisten wird das Vorhaben gemein-

sam im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsverbundes umgesetzt:

- IBAK Helmut Hunger GmbH & Co. KG, Kiel Bereitstellung des Kamerasystems nebst EDV-Umgebung
- Stadtentwässerung Braunschweig GmbH Bereitstellung der Datenbank und Definition der anwenderseitigen Anforderungen
- Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen Datenaufbereitung und fachliche Unterstützung bei Erarbeitung der Bilderkennungsalgorithmen
- Institut für Medizinische Informatik - Medizinische Bildverarbeitung - der RWTH Aachen Entwicklung der Bilderkennungsalgorithmen

Inspektionssystem

Für die Entwicklung der Softwaremodule müssen bereits die Urdaten, nämlich die Verfilmung der Kanalhaltung, standardisiert, vollständig und in hoher Bildqualität gewonnen werden. Diese drei Kriterien werden derzeit nur durch das Panorama-Inspektionsverfahren erfüllt. Zudem erzeugt dieses System die Urdaten in digitaler Form, wodurch die mit der Digitalisierung analoger Videobänder verbundenen Kosten und Qualitätsverluste vermieden werden.

Beim Panorama-System (Bild 5) werden im Gegensatz zu herkömmlichen TV-Inspektionssystemen keine Video-Kameras eingesetzt, sondern zwei digitale hochauflösende Fotokameras, die sich am vorderen und am hinteren Gehäuseende befinden. Jedes der Objektivs hat eine spezielle Fisheye-Optik mit einem halbsphärischen Bild von 185°.

Durch dieses Erfassungssystem wird in festen Abständen von 5 cm jeder Punkt der Kanalhaltung aus unterschiedlichsten Blickrichtungen erfasst, und es bleibt kein Teil der Rohrwandung ungefilmt (Bild 6).

Wegen der im Gegensatz zur TV-Technik verwendeten Blitzbeleuchtung, die eine Belichtungszeit von nur ca. 0,0005 Sekunden hat, entsteht



Bild 7: Perspektivische Ansicht eines schadhaften Stützens

mit diesem System keine Beeinträchtigung der Bildqualität durch Bewegungsunschärfe. Weiter kann durch die jederzeitige Reproduzierbarkeit der aufgenommenen Daten Zustandserfassung und Zustandsbewertung vollständig im Büro durchgeführt werden (Stein, Brauer und Broziewski, 2005).

Um eine kontinuierliche Bewegung dieser so erzeugten diskreten Kugelbilder und einen Blickwinkel wie bei einer konventionellen TV-Kamera zu erhalten, werden die Bilder mit mathematischen Rechenprozeduren weiterbearbeitet. Im Ergebnis kann das Kanalrohr in seinem gesamten Zustand auf dem Computermonitor auf zwei Arten wiedergegeben werden:

Eine perspektivische Darstellung mit voller (2 x 360°) Schwenk-/Neigeigenschaft und stets lagerichtigem Bild. Mit ihr können Muffen, Hausanschlüsse oder Schäden aus verschiedenen Blickrichtungen beurteilt werden (Bild 7).

Zusätzlich kann aus den Daten eine zweidimensionale Abwicklung (senkrechte Draufsicht auf die aufgeklappte innere Oberfläche der Leitung) erzeugt werden. Diese Darstellung erlaubt z.B. einen raschen Überblick über den Leitungszustand sowie ein leichtes Ausmessen von Objektpositionen und -größen (Bild 8).

Bei der Datenerfassung mit dem Panorama-System tritt die Fehlerquelle „nichtverfilmte Schadensbilder“ systembedingt nicht auf, und die aufgenommenen Filme besitzen eine hohe Bildschärfe. Jedoch erfolgt das Erkennen und Beschreiben der Schadensbilder in der täglichen kommerziellen Einsatzpraxis dieses Systems weiterhin manuell und weist wie bei der konventionellen Kanalverfilmung ein individuelles Fehlerpotential durch die auswertende Person auf.

Datengewinnung

Auf Basis bereits bestehender mit konventionellen Verfahren durchgeführter TV-Untersuchungen lagen umfangreiche Videoinformati-

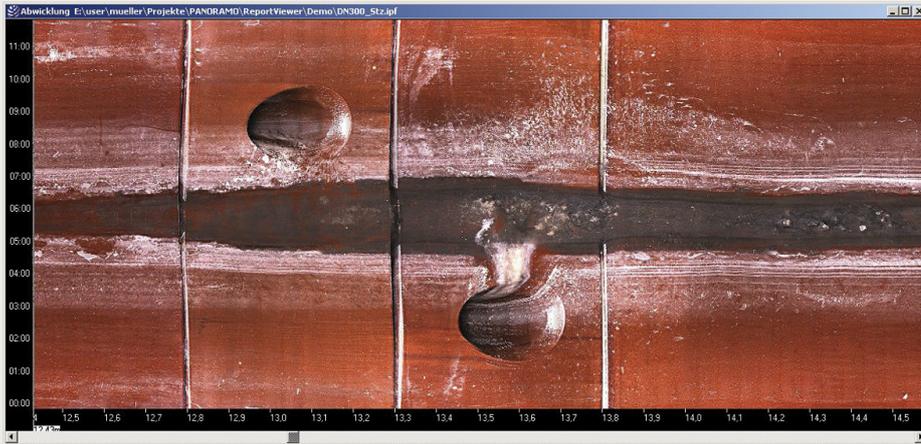


Bild 8: Zweidimensionale Rohrabwicklung

onen für das Kanalnetz der Stadt Braunschweig vor. Durch Auswertung dieser Inspektionsdaten (Schadensprotokolle und Filme/Fotos) und der Kanalstammdaten wurden durch das Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA) gezielt Kanalhaltungen ausgewählt, in denen ein repräsentativer Querschnitt von Schadensbildern und Schadensausmaßen sowie optischen Einflüssen (z. B. Materialfarbe, Abstand der Kanalwandung von der Inspektionseinheit) vor- kommt.

Dabei wurden in der 2005/2006 laufenden Projektphase die Rohrmaterialien zunächst auf Steinzeug beschränkt um die grundsätzliche Umsetzbarkeit der angestrebten Methodik darzustellen. In der zweiten Projektphase ist vorgesehen, die entwickelten Algorithmen für Betonrohre zu adaptieren. Da diese beiden Rohrmaterialien in aller Regel weit über 90% (ATV, 1996) der kommunalen Kanalisation ausmachen, ist die allgemeine Anwendbarkeit der zu entwickelnden EDV trotzdem gegeben, ohne dass auf Spezialfälle, wie z. B. bei Kanalhaltungen aus Kunststoff oder Mauerwerk vor- kommen, eingegangen werden muss.

Die aus Braunschweig abgerufenen Daten wurden durch das ISA nachgesichtet und an das Institut für Medizinische Informatik (MI) weitergeleitet. Dort erfolgt die nachfolgend beschriebene Entwicklung der Bilderkennungsalgorithmen in enger fachlicher Abstimmung mit dem ISA.

Bildverarbeitung

Zur Verarbeitung des Bildmaterials werden drei Aufgabenbereiche unterschieden: (I) Datenaufbereitung, (II) Datenzugriff und Vorverarbeitung, sowie (III) das Klassifikationssystem.

(I) Datenaufbereitung

Die Algorithmen zur Bildverarbeitung finden Anwendung auf die Abwicklungen der Kanalwand, welche aus den perspektivischen Videos der optischen Kanalinspektionen berechnet werden. Jedes generierte Einzelbild zeigt dabei einen Abschnitt von einem Meter Länge. Für die verschiedenen Verarbeitungsprozesse werden die Bilder zudem in mehreren Auflösungen und in Form von Merkmalsbildern vorgehalten.

Die Kanalelemente, Schäden, Hindernisse und die jeweiligen Zustandsinformationen werden in einer Datenbank nach Haltung, Inspektionsdatum, Distanz zum Haltungsanfang und Radialposition auf der Kanalwand gespeichert. Es ist daher eine Koordinatentransformation zwischen den so definierten Weltkoordinaten und den Einzelbildern und jeweiligen Pixelkoordinaten in allen verwendeten Auflösungen erforderlich.

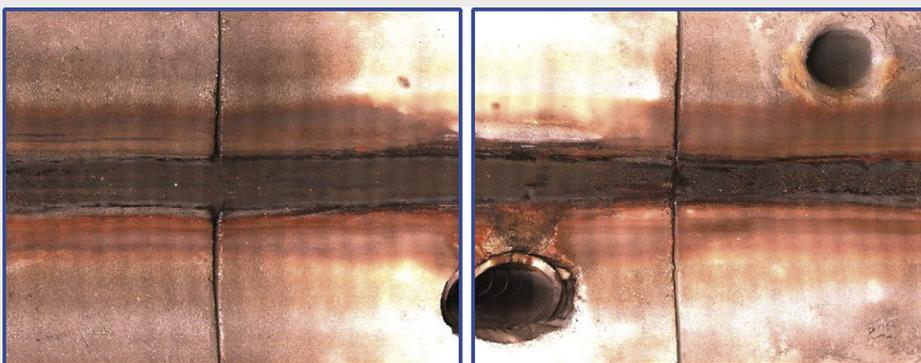


Bild 9: Zweidimensionale Rohrabwicklung und Aufteilung in Einzelbilder

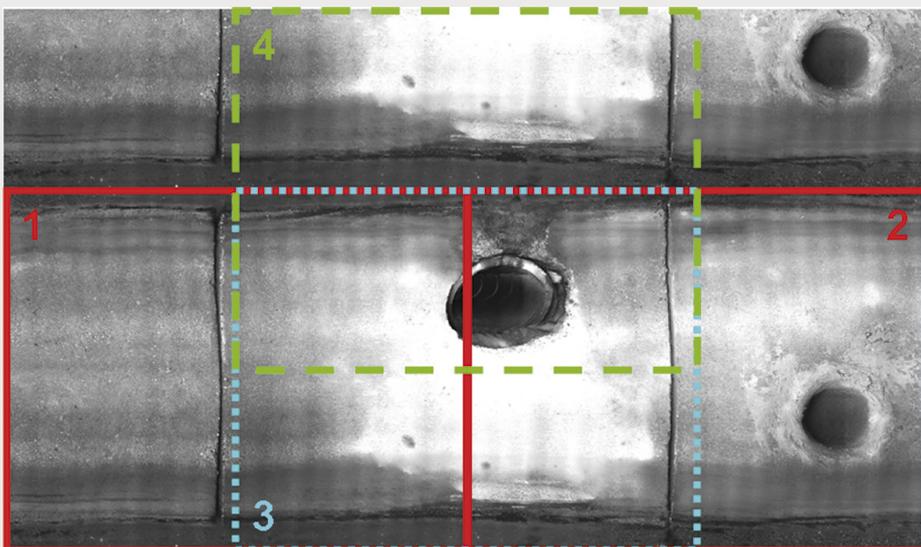
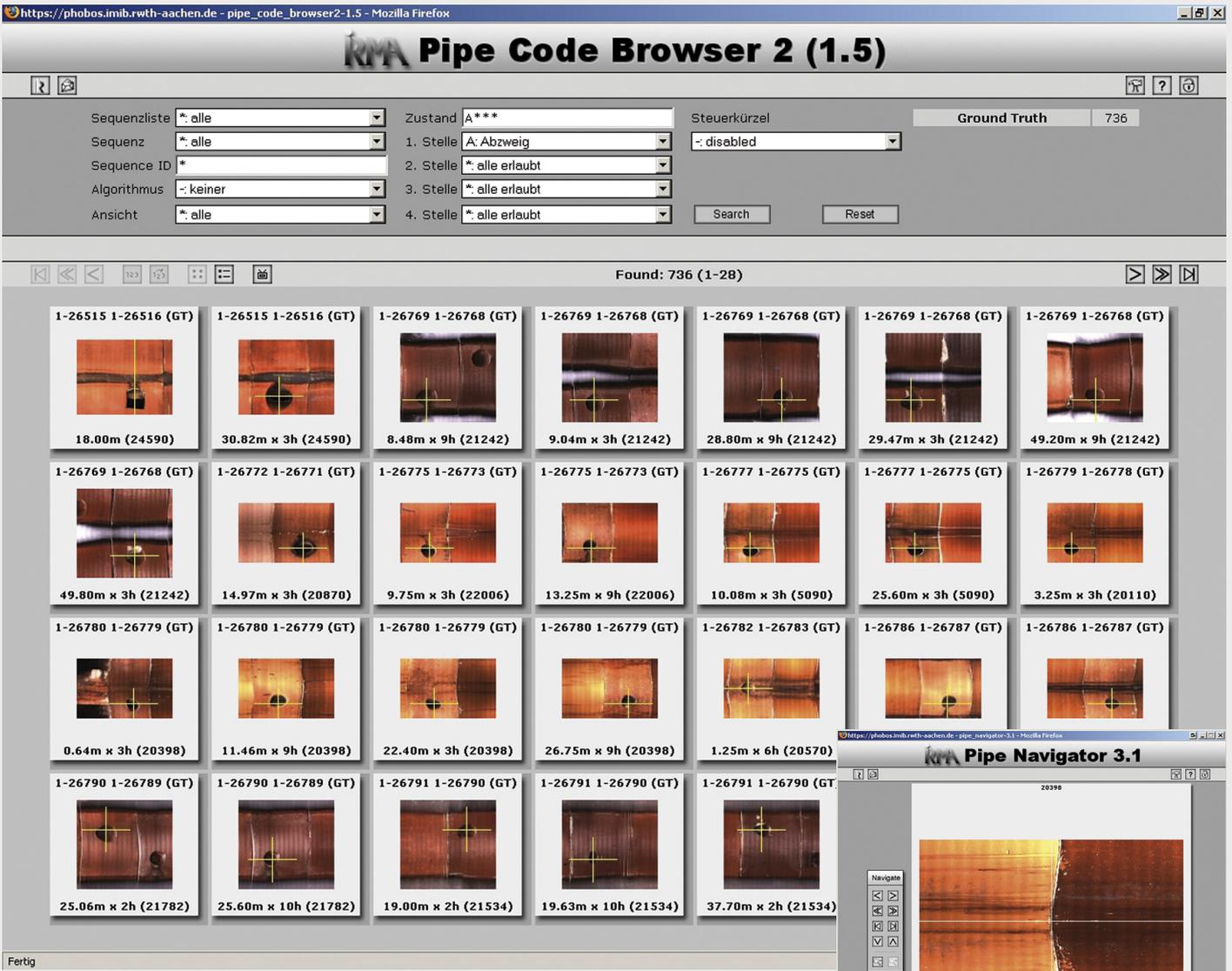


Bild 10: Zweidimensionale Rohrabwicklung und Aufteilung in Einzelbilder bei redundanter Datenhaltung



Zusätzlich zu der Koordinatentransformation ist zu beachten, dass die Bildinformation an den linken bzw. rechten Seitenrändern der Einzelbilder im vorherigen bzw. nächsten Bild fortgesetzt wird. So kann z.B. ein Hausanschluss über zwei Einzelbilder verteilt sein. Dieses Kontinuitätsproblem ist, bedingt durch die Abwicklung der Kanalwand, ebenfalls am oberen bzw. unteren Bildrand eines Bildes gegeben, so dass ein Anschluss unter Umständen nur zur Hälfte am oberen Bildrand sichtbar ist während die andere Hälfte am unteren Bildrand fortgesetzt wird. Bei der Entwicklung der Erkennungsalgorithmen müssen diese Effekte entsprechend berücksichtigt werden (Bild 10).
 Um dieses Problem zu umgehen und um darüber hinaus den Zugriff auf die einzelnen Positionen zu beschleunigen wurde eine redundante Datenhaltung generiert, die sicherstellt, dass jede optische Auffälligkeit vollständig auf einem Bild hinterlegt ist (Bild 10).

(II) Datenzugriff und Vorverarbeitung

Zur einfachen Kommunikation zwischen den Projektpartnern wurden mehrere browsergestützte Benutzerschnittstellen entwickelt. Neben dem Zugriff auf die Datenbanktabellen, wurden umfangreiche Visualisierungen der manuellen und automatischen Klassifikationen sowie statistischer Informationen entwickelt. Visualisierungen erlauben sowohl den Zugriff nach Haltung als auch nach Schadenscode. So lassen sich zum Beispiel durch Auswahl des ATV-Codes „A***“ alle Anschlüsse selektieren und auf diese Weise erstmals das volle Spektrum der unterschiedlichen Darstellungen erfassen. Dies ist nicht nur zur Entwicklung eines automatischen Klassifikationssystems von Vorteil, sondern kann auch bei der Schulung von Inspektionspersonal wertvolle Hilfestellung leisten (vgl. Bild 11).
 Zudem lässt sich zu einer Haltung schnell erkennen, ob die Anschlusscodierungen an

Bild 11: Haltungübergreifende Visualisierung, gefiltert nach Zustandskürzeln

den richtigen Positionen erfolgt sind, oder ob z.B. Zahlendreher oder sonstige Tippfehler in den Entfernungangaben vorliegen. Diese Art des Datenzugriffs erlaubt somit eine weitere Konsistenzprüfung bereits kodierter Haltungen.

(III) Klassifikationssystem

Da gemäß einer DWA-Umfrage von 2004 ca. 20 % der Schäden aus schadhafte Anschlüssen, 11 % aus undichten Muffen und weitere 12 % aus Lageabweichungen bestehen, die sich ebenfalls an den Muffen zeigen (Berger et

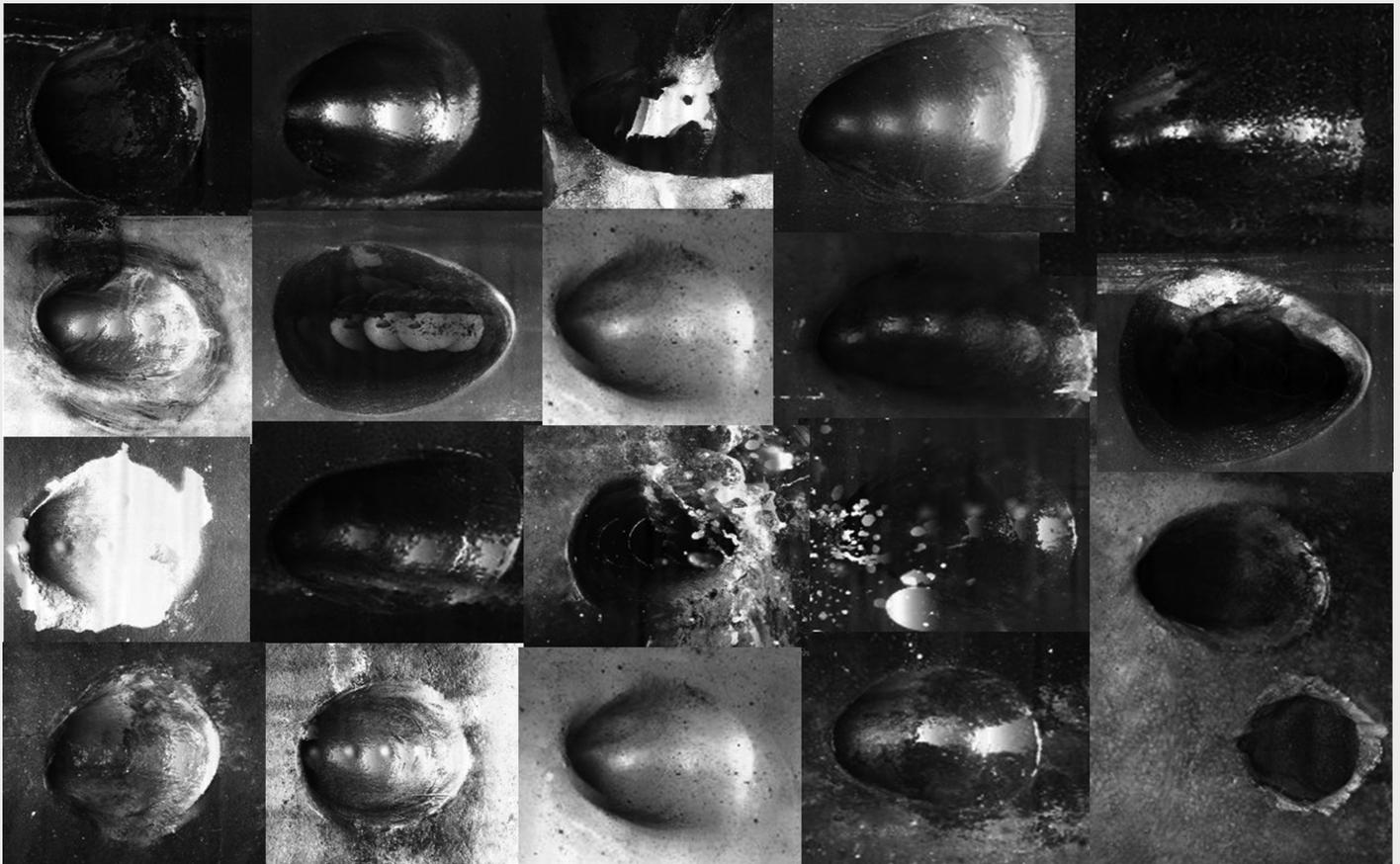


Bild 12: Beispiel der optischen Variabilität von Anschlüssen

al., 2004), bestanden die ersten beiden Ziele bei der Entwicklung eines automatischen Klassifikationssystems in der Erkennung von Muffen und Anschlüssen.

Anschlüsse könnten naiv als dunkle, homogene Kreise oder Ovale, mit einer kontrastreichen Abgrenzung zum umgebenden Material angenommen werden (vgl. Bild 8), Muffen dagegen als einzelne, klar abgegrenzte, dünne, dunkle und vertikale Geraden, die von oben bis unten im Bild durchgängig zu sehen sind. Wie Bild 12 illustriert, sind diese Annahmen in der praktischen Anwendung nur in den seltensten Fällen erfüllt, so dass Standardlösungen der Bildverarbeitung ausscheiden.

Zur Anschlusserkennung wurden sechs prototypische Klassen von Manifestationen der Anschlüsse in den Bildern identifiziert.

Die Erkennung dieser Klassen erfolgt durch eine Multiskalen-Analyse (Thies, 2003), bei der regionale Merkmale in jeder Skala mit denen

der Klassenprototypen verglichen werden (Bild 13). Die prototypischen Merkmale wurden in einem Trainingsprozess als Untermenge von

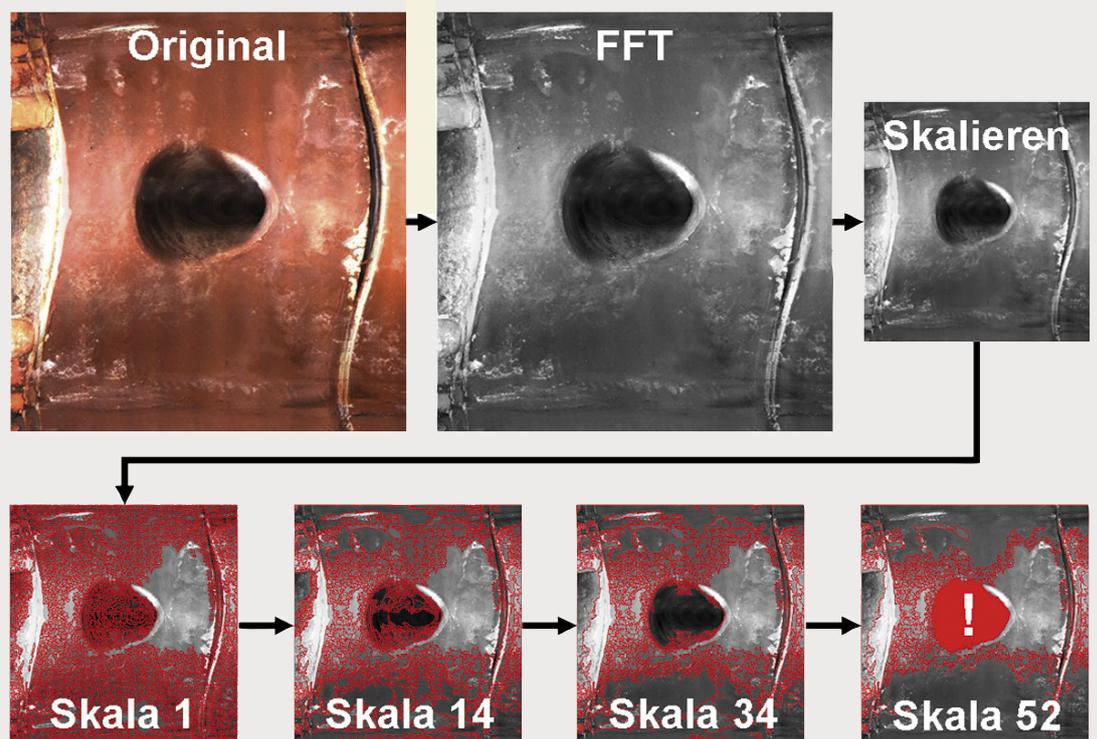


Bild 13: Identifizierung von Anschlüssen über Multi-Skalen-Analyse

51 Merkmalen zu Form, Textur und Bildstruktur ausgewählt. Die endgültige Entscheidung über das Vorliegen eines Anschlusses wird durch eine Kombination eines Intervallklassifikators mit einem Distanzklassifikator gefällt.

Die Muffenerkennung kann zwar ebenfalls durch Multiskalen-Analyse erfolgen, doch wird ein weniger rechenintensiver Fensterungsansatz gewählt. Dazu werden zunächst die Fourier-gefilterten Bilder durch einen Canny-Filter (Canny, 1986) bearbeitet, d.h. das Bild wird geglättet, ein Gradient berechnet und bei Unterdrückung von Nicht-Maxima in ein binäres Kantenbild überführt.

Da sich Muffen durch lange Kanten in vertikaler Richtung auszeichnen, werden die Gradienten in horizontaler Richtung bestimmt. Nach Entfernung der kurzen Kanten, verbleiben lediglich lange, vertikale Kanten im Bild. Ein Fenster, das über die gesamte Bildhöhe geht, jedoch lediglich so breit wie die maximal beobachtete Muffenbreite ist, wird dann von links nach rechts über das Bild geschoben und die Prozentzahl der Höhe bestimmt, die im aktuellen Ausschnitt von Kanten überdeckt ist (vgl. Bild 14).

Auf analoge Weise lässt sich die Fließspur erkennen, wenn die um 90 Grad gedrehten Operatoren angewendet werden. Dies kommt einer späteren Erkennung schadensfreier Bereiche zwischen Muffen zugute, bei der von den auffälligen Bildbereichen bereits detektierte Elemente wie z.B. Muffen, Anschlüsse oder die Fließspur ausgenommen werden, da diese besonders analysiert werden.

Ergebnisse

Durch Bildverarbeitungsmethoden konnten bereits in diesem frühen Projektstadium beinahe alle Anschlüsse und Muffen identifiziert werden. Zur Evaluation der Anschlusserkennung wurden 414 zufällig ausgewählte Bilder verwendet, die insgesamt 437 Anschlüsse enthielten.

Von diesen wurden 369 korrekt, 68 dagegen nicht erkannt und 37 Positionen wurden fälschlich als Anschluss markiert. Dies führt zu einer Erkennungsrate (Recall) von 84,4 Prozent, mit einer Präzision von 92 Prozent wodurch sich ein F-Measure-Wert von 0,88 ergibt. Dabei ist zu beachten, dass 30 der 37 fälschlich markierten Stellen direkt an einer Muffe positioniert waren und somit durch Vorschalten der Muffenerkennung vermeidbar sind.

Die Muffenerkennung wurde bereits auf einer deutlich größeren Referenzmenge evaluiert. Insgesamt wurden 322 komplette Kanalhaltungen untersucht, in denen 9241 Muffen ent-

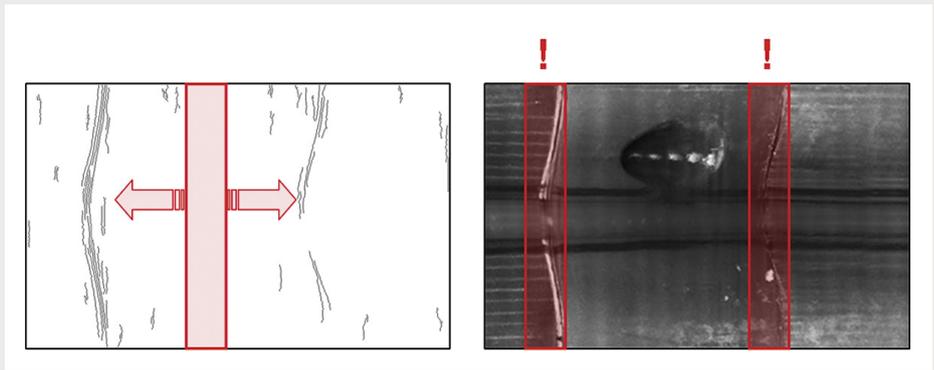


Bild 14: Muffen Detektion mittels Sliding Window-Methode

halten waren. Richtig erkannt wurden 9194 Muffen, 33 wurden nicht erkannt, 47 Stellen wurden fälschlich als Muffen erkannt. Die Erkennungsrate beträgt somit 99,49 Prozent mit einer Präzision von 99,64 Prozent, so dass ein F-Measure-Wert von 99,57 resultiert.

Ausblick

Da die entwickelten Lösungen bereits jetzt eine hohe Qualität in der Erkennung liefern, ist die Auswahl von Rohren ohne optische Auffälligkeiten (schadens- und anschlussfreie Rohre) möglich. Für den Projektabschluss der Phase 1 des Vorhabens wird erwartet, dass sich Rohre mit optischen Auffälligkeiten mit hoher Genauigkeit erkennen lassen und dem Inspekteur für die weitere Diagnose angezeigt werden können.

Dieser erste Schritt stellt bereits eine deutliche Arbeitserleichterung für den untersuchenden Ingenieur dar: Sein Fokus kann sich dann von der ermüdenden und fehleranfälligen Schadensuche auf die Schadensdiagnose richten. Als weiterführende und parallele Schritte werden Algorithmen zur Erkennung der unterschiedlichen Schäden, wie beispielsweise Risse, Hindernisse oder Lageabweichungen entwickelt, um dem inspizierenden Ingenieur schrittweise zusätzliche Unterstützung zukommen zu lassen.

In der angestrebten zweiten Projektphase wird die Implementierung der Algorithmen in der EDV-Umgebung des Panorama-Systems ebenso wie die Evaluierung der Algorithmen anhand von Inspektionen des Braunschweiger Kanalsystems angestrebt.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben Entwicklung und Erprobung eines digitalen Bilderkennungs- und Bildverarbeitungsverfahrens zur objektiven Zustandserfassung von Kanalisationen wird gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU).

Literatur

- ATV-Merkblatt M 149: Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, 1999
 BBR, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Baulicher Umweltschutz - Abwassertechnik <http://www.bbr.bund.de/bauwesen/umweltschutz/abwassertechnik.htm#Text2>
 BERGER, C. LOHAUS, J. WITTNER, A. SCHÄFER, R. (2002): Der Zustand der Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland. Ergebnisse der ATV-Umfrage 2001. Korrespondenz Abwasser, 2002, H. 3, S. 302
 BERGER, C., LOHAUS, J. (2004). Der Zustand der Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland. Ergebnisse der ATV-Umfrage 2004. www.dwa.de
 CANNY, J.F. (1986). A computational approach to edgedetection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, 8 (6), 679-698
 DIN-EN 752 Teil 5: Sanierung. Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1997
 HUBEN, S. (2002). Einflüsse auf die Qualität der Zustandsklassifizierung von Kanalhaltungen. Diplomarbeit am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (unveröffentlicht), 2002
 MÜLLER, K. (2004). Strategien der Zustandserfassung von Abwasserkanälen. Entwicklungen in der Kanalisationstechnik, Köln, 2004
 MÜLLER, K. DOHMANN, M. (2002). Entwicklung eines allgemein anwendbaren Verfahrens zur selektiven Erstinspektion von Abwasserkanälen und Anschlussleitungen. Abschlussbericht Teil A: wissenschaftliche Untersuchungen, Teil C: Handlungsanleitung Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA), 12/2002
 STEIN, D., BRAUER, A., BROZIEWSKI, A. (2005). Optische Zustandserfassung von Kanalisationen - volldigital oder analog? Korrespondenz Abwasser., Nr.3, 259-268.
 THIES, C., METZLER, V., AACH, T. (2003) Content-Based Image Analysis: Object Extraction by Data Mining on Hierarchically Decomposed Medical Images. *Proceedings SPIE.*, 5032, 579-589 ■