

# Multisensorsystem geoASYS zur 3D Kanaldokumentation

Philipp STRIEGL, Hansbert HEISTER, Admire KANDAWASVIKA,  
Wolfgang REINHARDT und Jörg RENTER

## 1 Einführung und Hintergrund

### 1.1 Allgemeines

Nachdem die öffentlichen Kanalnetze in den letzten 20 Jahren im Mittelpunkt der Untersuchungen standen, findet im Bereich des Abwasserwesens ein Wandel statt. Die Lage sowie der Zustand des öffentlichen Kanalsystems sind heutzutage weitreichend bekannt. Aufgrund von rechtlichen Bestimmungen durch die EU rücken nun die privaten Hausanschlüsse, auch Grundstücksentwässerungsanlagen (GEA) genannt, welche die Gebäude mit den öffentlichen Hauptkanälen verbinden, in den Mittelpunkt des Interesses der Abwasserbranche. In Fachkreisen wird die Gesamtlänge der GEA in Deutschland auf 1.500.000 Kilometer geschätzt. Viele Experten gehen davon aus, dass unbekannte Schadstellen in diesem Bereich ein großes Risiko für Mensch und Umwelt darstellen können. (BAUER, HEISTER & REINHARDT 2009)

Aus diesem Grund müssen diese privaten Kanalnetze inspiziert, auftretende Schäden lokalisiert und anschließend nachhaltig saniert werden. Somit muss neben der Inspektion des Kanals auch die Bestimmung seines Verlaufs in Lage und Höhe (Vermessung) durchgeführt werden. Dies stellt eine Herausforderung dar, da es sich bei diesen Netzen häufig um komplexe Entwässerungssysteme mit vielen Verzweigungen handelt. Geprägt durch eine Vielzahl an Geraden-, Bögen- und anderen Krümmungselementen sind sie keinesfalls mit den Freispiegelkanälen der öffentlichen Entwässerungsanlagen zu vergleichen. Die Schwierigkeit bei der Dokumentation von GEA liegt vor allem darin, dass das Leitungssystem sich in der Regel im Untergrund befindet und die Rohre mit nur ca. 10-15 Zentimeter Durchmesser sehr schwer zugänglich sind.

Das Multisensorsystem geoASYS ist in der Lage den geometrischen Verlauf von GEA zu erfassen. Die Genauigkeit der Erfassung ist stark von der Länge der zu erfassenden Leitung abhängig. Um die geforderte Genauigkeit auch bei längeren Strecken einhalten zu können, darf nicht nur die Qualität der Sensoren und Algorithmen betrachtet werden. In diesem Zusammenhang ist auch das Bewegungsmodell von geoASYS zu berücksichtigen. Dazu muss beispielsweise überprüft werden, inwiefern sich das System wie bisher angenommen, entlang der mittleren Rohrachse bewegt. Die Weiterentwicklung des Bewegungsmodells und die dabei zu berücksichtigenden Faktoren stehen im Mittelpunkt dieses Beitrags.

## 1.2 Anforderungen an das Multisensorsystem geoASYS

Das System geoASYS wurde speziell zur geometrischen Dokumentation von GEA entwickelt. Es ist in der Lage, im Zuge einer TV-Inspektion den Verlauf der Leitungen in Lage und Höhe zu dokumentieren. Entwickelt wurde das System in Zusammenarbeit mit der Firma JT-Elektronik.

Folgende Anforderungen waren bei der Entwicklung von geoASYS zu berücksichtigen:

- Die Systemhardware von geoASYS muss in die Inspektionshardware, in diesem Fall die Vorschubeinheit „Lindauer Schere“ (auch Untersuchungseinheit genannt) von JT-Elektronik, integrierbar sein.
- Das System muss unempfindlich gegen Umwelteinflüsse und äußere Störungen sein.
- Das System muss einfach bedienbar sein, d. h. auch der Inspekteur ohne geodätischen Hintergrund soll die Steuerung übernehmen können.
- Der zusätzliche Zeitbedarf für die geometrische Dokumentation darf nicht zu groß sein.
- Vorliegende Luftbilder oder Karten müssen eingebunden und visualisiert werden können, um dem Inspekteur als Orientierungshilfe zu dienen.
- Während der Messung müssen schon dokumentierte Bereiche des Netzes visualisiert werden.

Im Moment ist geoASYS das einzige auf dem Markt befindliche Verlaufsvermessungssystem, welches in der Lage ist in Echtzeit Geometrie und Topologie der Leitungsnetze dreidimensional aufzunehmen und zu visualisieren.

## 1.3 Vorteile der geometrischen Dokumentation von Grundstücksentwässerungsanlagen

Bevor in den weiteren Kapiteln näher auf die Funktionsweise von geoASYS eingegangen wird, sollen an dieser Stelle die erwarteten Vorteile der geometrischen Dokumentation von GEA dargestellt werden. Experten im Bereich des Abwasserwesens sind sich einig, dass die geometrische Lagedokumentation in Kombination mit der TV-Inspektion mehrere Vorteile mit sich bringt (BAUER 2005). Die Bestimmung der Lage von Schadstellen, um zügig, unkompliziert und wirtschaftlich Schäden beheben zu können und damit die Umwelt zu schützen ist eins der Hauptargumente für eine geometrische Dokumentation von GEA. Aber nicht nur in diesem Bereich hat die geometrische Dokumentation Vorteile, sondern es sind beispielsweise die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

### *Lage von Schadstellen*

Nach Aussage von Experten ist die Kenntnis der genauen Lage und Höhe der GEA für eine sachgerechte Sanierungsberatung und Sanierungsplanung unabdingbar. Mit Hilfe einer Verlaufsvermessung kann die komplette Geometrie der GEA in einem lokalen oder lan-

desweiten Koordinatensystem erfasst werden. Dies ermöglicht die genaue Positionsbestimmung von markanten Stellen, wie beispielsweise Schadstellen im Leitungsverlauf. Für zukünftige Sanierungsmaßnahmen kann dies von großem Nutzen sein. Anhand der gemessenen Koordinaten der Schadstellen können Baumaßnahmen örtlich relativ begrenzt durchgeführt werden.

### *Inspektionsablauf*

Die Echtzeitdarstellung der Geometrie und Topologie, beispielsweise auf einer Stadtgrundkarte, gibt dem Inspekteur eine Orientierungshilfe. Der Auftrag, eine Anschlussleitung beispielsweise bis zur Grundstücksgrenze oder bis zu einer vordefinierten Hauswand zu untersuchen, wird ihm aufgrund der Darstellung der Lage der Untersuchungseinheit in der Grafik ermöglicht. Der Inspekteur hat des Weiteren die Möglichkeit, im Rahmen der Inspektion die jeweilige Leitung einem Objekt (Grundstück, Haus, Straßenablauf) zuzuordnen. Diese Zuordnung bildet die Grundlage für den weiteren Umgang mit der inspizierten Leitung. Es wird sichergestellt, dass bei der weiteren Bearbeitung der jeweils rechtlich Verantwortliche zugeordnet werden kann.

### *Bestandsdokumentation*

Durch die Bestandsdokumentation von GEA besteht die Möglichkeit, die Anschlusskanäle ganzheitlich mit in die Planung der öffentlichen Kanalisation einzubeziehen. Insbesondere der Höhenverlauf von Anschlussleitungen ist für die Tiefenlage des öffentlichen Kanals verantwortlich. Durch die 3D- Information besteht zum Teil die Möglichkeit, die Tiefenlage des öffentlichen Kanals nach oben zu korrigieren. Im Rahmen von Baumaßnahmen können so Kosten aufgrund der geringeren Tiefe eingespart werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, Anfragen von Versorgungsunternehmen hinsichtlich freier Verlegetrassen einfach anhand der vorhandenen Lageinformationen zu beantworten.

### *Kanalsanierungsplanung*

Die ausschlaggebenden Informationen für die Erstellung eines Sanierungskonzepts sind der Zustand und die Lage des Kanals. Diese bilden die Grundlage für technische und wirtschaftliche Entscheidungen. Interessant sind dabei beispielsweise folgende Fragestellungen: In welcher Tiefe liegt ein Anschlusskanal? Liegt er in der unbefestigten Vorgartenfläche oder in der gepflasterten Garageneinfahrt? Diese Informationen sind bei der Entscheidungsfindung für ein wirtschaftliches Sanierungskonzept unumgänglich. Darüber hinaus können die Kosten bei Erneuerung und/oder Sanierung von gemeinsam genutzten Entwässerungskanälen aufgrund der gewonnenen Kenntnis über die Lage kantenscharf dem jeweiligen Eigentümer zugeordnet werden.

## 2 ASYS Systemüberblick

### 2.1 Grundlagen

Um GEA sinnvoll dokumentieren zu können, müssen vordefinierte Genauigkeitsanforderungen eingehalten werden. Üblicherweise wird eine Lagegenauigkeit von 0.5 Meter gefordert. Dies entspricht ungefähr der Schaufelbreite eines Baggers. Die erforderliche Höhen Genauigkeit sollte unter 0.1 Meter liegen. Diese Angaben erscheinen aus geodätischer Sicht im ersten Moment nicht sehr anspruchsvoll. Berücksichtigt man die Bedingungen unter denen diese Genauigkeitsmaße erreicht werden müssen, erkennt man schnell, dass dies keine triviale Problemstellung darstellt.

Konventionelle Messtechniken, wie GPS oder Tachymetrie sind zur Dokumentation von Grundstücksentwässerungsanlagen nicht geeignet. Es ist unmöglich diese Systeme bei im Untergrund befindlichen, durchschnittlich 10 Zentimeter großen Rohrsystemen einzusetzen. Aus diesem Grund müssen alternative Sensorelemente verwendet werden. Die komplexen Verarbeitungsprozesse von geoASYS stützen sich aktuell vorrangig auf Informationen von zwei Sensoren, einem Odometer (Wegstreckengeber) und einem miniaturisierten Inertialmesssystem (engl.: Inertial Measurement Unit IMU). Das Inertialmesssystem besteht aus drei Vibrationskreisel, drei Beschleunigungs- und drei Magnetfeldsensoren und ermöglicht die Durchführung von Winkel- und Beschleunigungsmessungen während des gesamten Inspektionsverlaufs. Die Dimension der eingesetzten IMU beträgt ca. 38 x 35 x 21 mm in Breite, Länge und Höhe. Somit kann sie ohne großen Aufwand auf Vorschubeinheiten von TV-Inspektionssystemen, wie beispielsweise auf der von JT-Elektronik entwickelten „Lindauer Schere“ (Abb. 1) eingebaut werden.

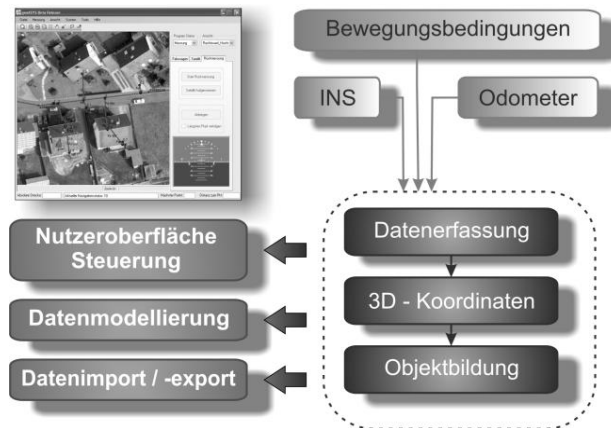


**Abb. 1:** Lindauer Schere mit eingebautem Inertialmesssystem (schematisch)

Bei dem zweiten Sensor handelt es sich wie schon oben erwähnt, um ein sogenanntes Odometer. Dieses ist an der im Inspektionsfahrzeug befindlichen Kabeltrommel des Versorgungsschlauches angebracht. Das Odometer ermöglicht Weginformation über den Kabelvorschub abzugreifen. Dadurch kann der zurückgelegte Weg der Vorschubeinheit zu jedem Zeitpunkt der Inspektion bestimmt werden.

Aus den gewonnenen Messwerten der Sensoren lassen sich mit Hilfe von speziell entwickelten Algorithmen die Richtungsänderungen und Streckenmessungen der Vorschubein-

heit ableiten. Somit können von einem bekannten Startpunkt aus, nach dem Prinzip der Koppelnavigation, die Koordinaten von jedem Wegpunkt aus Richtungsänderungen und entsprechenden Längen berechnet werden. Die Darstellung von Kurven oder Abzweigungen erfolgt durch Approximation mit Hilfe von kurzen Geradenstücken.



**Abb. 2:** geoASYS – Systemüberblick

Des Weiteren werden zur Stabilisierung des Systems Bewegungsbedingungen innerhalb des Messablaufs mitberücksichtigt. Darunter fallen beispielsweise vorhandene Informationen über den aktuellen Rohrverlauf, wie Geradlinigkeit oder bekannte Winkel von Krümmungselementen.

Um die Systemintegrität sowie eine hochgenaue Dokumentation des geometrischen und topologischen Verlaufs gewährleisten zu können, müssen alle gewonnenen Informationen durch geoASYS kombiniert und strukturiert verarbeitet werden. Abbildung 2 zeigt den systematischen Aufbau von geoASYS.

## 2.2 Erfassungsproblematik

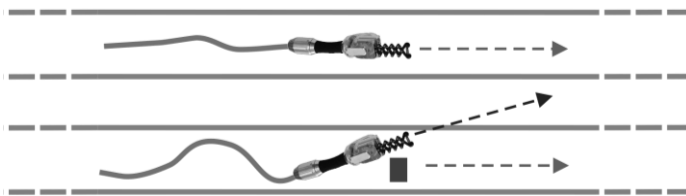
Praxistests mit geoASYS bei dem Kasseler Entwässerungsbetrieb lieferten sehr gute Ergebnisse. Bei Messungen in Rohrleitungen bis circa 20 Meter Länge stimmen die geoASYS Messdaten mit der tatsächlich vermessenen Lage des Anschlusskanals bei sachgerechter Handhabung im geforderten Genauigkeitsrahmen überein. Die Praxistests haben aber auch verschiedene Problemstellungen aufgezeigt, für die noch zufriedenstellende Lösungen gefunden werden müssen:

### *Drifteffekte*

Bei den Vibrationskreiseln des Inertialmesssystems traten, wie erwartet, sogenannte „Drift“-Effekte auf. Diese haben eine Größenordnung von ungefähr 1 Grad pro Minute und wirken sich direkt auf die Winkelmessungen und damit auch auf die Genauigkeit der endgültigen Lage aus. Mit Hilfe von entsprechenden Messanordnungen und Algorithmen können diese „Drift“-Effekte jedoch gut kompensiert werden.

### *Schwimmwinkel*

Eine weitere Problemstellung ergibt sich durch die Bewegung der Lindauer Schere innerhalb des Rohres. Im angenommenen Bewegungsmodell folgt die Schere der mittleren Achse des jeweiligen Rohrelements. Die Praxistests haben aber gezeigt, dass beispielsweise durch die Steifheit von Untersuchungseinheit und Versorgungsschlauch, durch Hindernisse innerhalb des Rohres (Verschmutzungen) oder durch Manöverfehler des Operateurs das System von der Rohrachse abweicht. Es können Schwimmwinkel zur Rohrachse auftreten, welche von der IMU erfasst und in den Berechnungsprozess mit eingebracht werden. Dies hat zur Folge, dass das System innerhalb eines geraden Rohrverlaufes nicht vorhandene Richtungsänderungen registriert. Abbildung 3 verdeutlicht die auftretende Problematik.



**Abb. 3:** Optimale Lage des Systems (oben) und Lage mit "Schwimmwinkel" (unten)

## 2.3 Lösungsansätze

Um der zuletzt genannten Problematik entgegen zu wirken und die Genauigkeit des Messablaufs insgesamt noch weiter zu verbessern, werden momentan mehrere Lösungsansätze in Betracht gezogen:

- Die Stabilisierung von geoASYS innerhalb der Rohrachse durch mechanische oder druckbasierte Systeme
- Rechnerische Korrektur der Lage von geoASYS innerhalb des Rohres mit Hilfe von miniaturisierten 3D-Scannern
- Nutzung von zwei IMU Einheiten, um auftretende Schwimmwinkel zu detektieren und diese durch Algorithmen zu korrigieren
- Erweiterung des aktuellen Bewegungsmodells unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren

Die Erweiterung des Bewegungsmodells stellt den Schwerpunkt dieser Arbeit dar und wird in den folgenden Abschnitten genauer betrachtet.

## 3 Bewegungsmodell

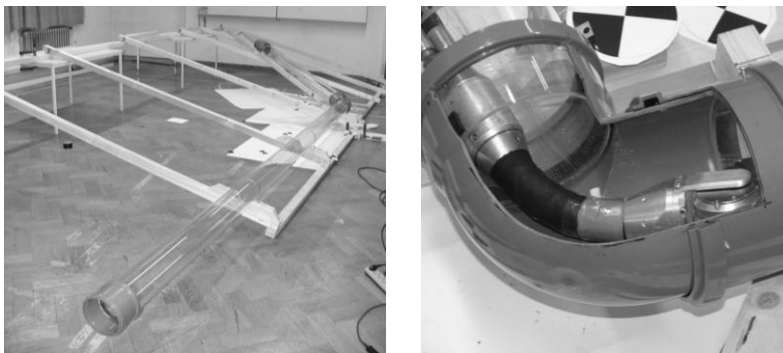
Das derzeit verwendete Bewegungsmodell basiert auf der oben beschriebenen Annahme, dass die Vorschubeinheit immer der mittleren Achse des Rohrsystems folgt. Um die Genauigkeit zu erhöhen und die oben genannten Fehlereinflüsse berücksichtigen zu können, muss bei diesem Lösungsansatz das bisherige Bewegungsmodell erweitert werden. Eine

Grundlage für die Erweiterung ist die Dokumentation der Bewegungen der Untersuchungseinheit. Dazu ist es aber notwendig, Einsicht in die Bewegungsvorgänge innerhalb eines Rohres zu erlangen. Aus diesem Grund wurde ein einfaches Rohrsystem aus transparenten Rohren nachgebaut. Mit Hilfe von photogrammetrischen Verfahren und umfangreichen Tests wurde überprüft, ob der Bewegungsablauf der Untersuchungseinheit innerhalb des Rohrsystems reproduzierbar ist. Sollte dies der Fall sein, können die gewonnenen Testergebnisse als Grundlage für die Entwicklung eines erweiterten Bewegungsmodells dienen.

### 3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht insgesamt aus drei Rohrelementen. Zwischen zwei geraden, transparenten Plexiglasrohren (vier und zwei Meter lang) befindet sich ein austauschbares Krümmungselement (Abb. 4 links). Trotz intensiver Recherchen konnte kein Rohrproduzent gefunden werden, der ein handelsübliches Abwasserkrümmungselement aus transparentem Kunststoff herstellt. Aus diesem Grund wurde aus einem handelsüblichen Krümmungselement ein Sichtfenster heraus gefräst, um ebenfalls Einsicht in die Bewegungsvorgänge während der Befahrung der Krümmung zu erhalten (Abb. 4 rechts). Der Durchmesser des Rohrsystems beträgt 150 mm.

Für die Durchführung dieses Versuches ist es von großer Bedeutung, dass die Randbedingungen bei jedem Durchlauf identisch sind. Dies kann nur gewährleistet werden, wenn die innere Geometrie des Rohrsystems, d. h. die Lage der Elemente des Rohrnetzes zueinander unverändert bleibt. Nur unter dieser Voraussetzung kann eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Bewegungsverläufe getroffen werden. Aus diesem Grund wurde ein circa 4 x 3 Meter großes Grundgerüst konstruiert, auf dem die einzelnen Rohrelemente sicher fixiert werden konnten.



**Abb. 4:** Auf dem Grundgerüst befestigtes Rohrsystem für die Bewegungsuntersuchung (Abb. links) und Krümmungselement mit ausgefrästem Sichtfenster (Abb. rechts)

### 3.2 Versuchsdurchführung

Das Ziel dieser Untersuchung ist, wie schon erwähnt, eine Aussage darüber zu treffen, inwiefern die Bewegungsverläufe der Untersuchungseinheit von geoASYS innerhalb eines Rohres reproduzierbar sind. Dazu ist es nicht notwendig, die Bewegungsverläufe absolut,

also innerhalb eines fest definierten Koordinatensystems zu bestimmen. Eine relative Betrachtung der einzelnen Befahrungen zueinander ist für diesen Zweck völlig ausreichend.

Mittels einer mobilen Einheit von geoASYS wurden die Befahrungen des Rohrsystems durchgeführt. Das Prinzip dieses mobilen Systems basiert auf dem sogenannten „Schiebebetrieb“. Die Untersuchungseinheit wird dabei mit Hilfe eines steifen Schiebeaals und einer am Anfang des Rohrsystems angebrachten, mechanischen Vorschubeinheit in das Rohrsystem vorgetrieben.

Insgesamt wurden vier Hauptuntersuchungen mit folgenden Randbedingungen durchgeführt:

#### **Hauptuntersuchung I**

Befahrung des Rohrsystems mit einem eingebauten Krümmungselement von  $45^\circ$ . Die Grundkonstruktion liegt eben, d. h. ohne Verkippung vor (Abb. 5 links).

#### **Hauptuntersuchung II**

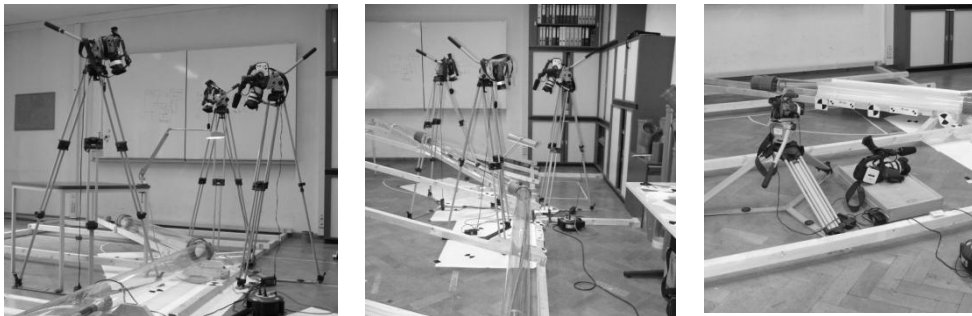
Befahrung des Rohrsystems mit einem eingebauten Krümmungselement von  $45^\circ$ . Die Grundkonstruktion liegt um circa  $20^\circ$  gekippt vor (Abb. 5 Mitte).

#### **Hauptuntersuchung III**

Befahrung des Rohrsystems mit einem eingebauten Krümmungselement von  $90^\circ$ . Die Grundkonstruktion liegt eben, d. h. ohne Verkippung vor.

#### **Hauptuntersuchung IV**

Befahrung des Rohrsystems mit einem eingebauten Krümmungselement von  $45^\circ$ . Die Grundkonstruktion liegt eben, d. h. ohne Verkippung vor. In diesem Fall sind die Kameras in seitlicher Lage zum Rohrsystem angebracht. Dadurch lässt sich insbesondere das Höhenprofil der Untersuchungseinheit in den beiden Geradenstücken dokumentieren (Abb. 5 rechts).



**Abb. 5:** Versuchsaufbau Hauptuntersuchung I (Abb. links), Versuchsaufbau Hauptuntersuchung II (Abb. Mitte) und Versuchsaufbau Hauptuntersuchung IV (Abb. rechts)

Eine Hauptuntersuchung besteht aus mindestens 30 Befahrungen, jeweils mit langsamer ( $\sim 0.5$  km/h) und relativ hoher (3 km/h) Geschwindigkeit. Eine Befahrung setzt sich

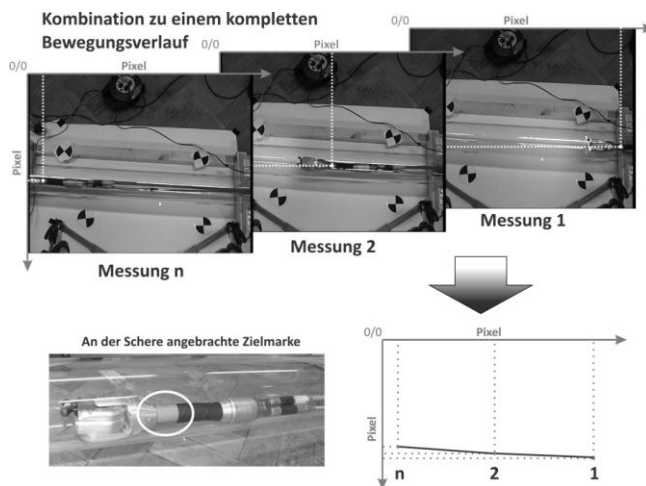


dabei immer aus einer Hin- und Rückmessung zusammen. Unter Hinmessung wird die komplette Befahrung in das Rohr hinein verstanden. Die Rückmessung bezeichnet das „Zurückziehen“ der Untersuchungseinheit aus dem Rohrsystem. Beide Messungen unterscheiden sich signifikant hinsichtlich ihres Bewegungsablaufes. Die Rückmessung verläuft wesentlich ruhiger und kontinuierlicher als die Hinmessung, auch bei Versuchen mit hoher Geschwindigkeit. Aus diesem Grund wurden bei den Untersuchungen Hin- und Rückmessungen getrennt voneinander betrachtet.

### 3.3 Auswertung

Die Auswertung erfolgt mit Hilfe eines photogrammetrischen Objekterkennungsalgorithmus. Zur Objekterkennung werden verschiedene Filtermodelle (Gauß-Filter) und Kantenextraktionsverfahren (Canny Algorithmus und Hough Transformation) verwendet. In diesem Fall soll nur die Lage der Untersuchungseinheit in der Bildebene erfasst werden. Es handelt sich somit um eine zweidimensionale Erfassung eines Objektes innerhalb eines Bildes.

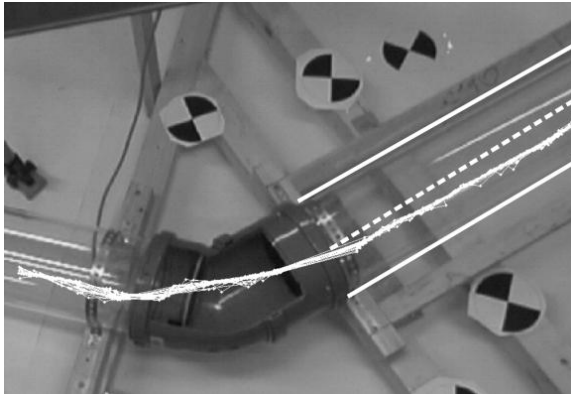
Mittels dreier Videokameras werden die Bewegungen der Untersuchungseinheit in den drei Rohrelementen erfasst: Gerade-Krümmung-Gerade mit einer Auflösung von 720 x 576 Pixel dokumentiert. Die Kameras sind nahezu senkrecht über den jeweiligen Rohrelementen angebracht und erfassen einen Rohrabschnitt von ca. 1 – 1.5 m. Die Aufzeichnungsraten der Kameras betragen 25 Bilder pro Sekunde. Dem entsprechend können pro Sekunde durchschnittlich 25 Messungen durchgeführt werden. Die aufgenommenen Videos werden im Postprocessing-Verfahren in die einzelnen Frames (Bilder) auf gesplittet und mit Hilfe des Objekterkennungsalgorithmus analysiert. Dieser bestimmt in jedem Frame die Mittelpunktkoordinate der an der Untersuchungseinheit angebrachten Zielmarke. Die Kombination der einzelnen Messungen liefert eine zweidimensionale Darstellung des Bewegungsverlaufes der Untersuchungseinheit (siehe Abb. 6). Die Überprüfung des Algorithmus hat ergeben, dass die Zielmarke im Idealfall mit einer Messunsicherheit von 1 Millimeter erfasst werden kann.



**Abb. 6:** Verfahrensbeschreibung zur Erfassung der Bewegungsabläufe innerhalb eines Videos

### 3.4 Ergebnisse

Die Untersuchungen haben wie erwartet bestätigt, dass das bisher verwendete Bewegungsmodell nicht den wahren Bewegungsverlauf einer Untersuchungseinheit widerspiegeln kann. Der Bewegungsverlauf der Lindauer Schere weicht oft von der mittleren Rohrachse ab und verfälscht damit die Dokumentation der Lage des Rohrsystems. In Abb. 7 ist dies veranschaulicht.



**Abb. 7:** Lageabweichung der Lindauer Schere von der mittleren Rohrachse (gestrichelt)

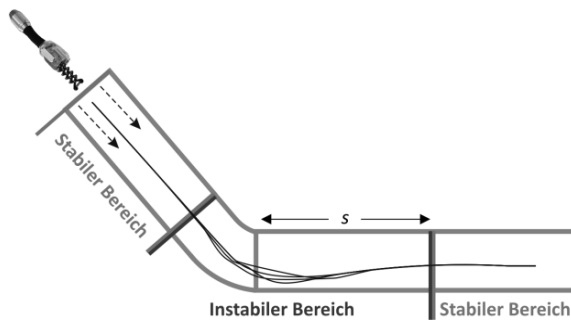
In dieser Abbildung sind Bewegungsverläufe von 15 Befahrungen der Lindauer Schere dargestellt. Obwohl die Lindauer Schere schon ein Stück in das gerade Rohrelement eingefahren ist, befindet sie sich noch nicht in der Rohrachse (Abb. 7, gestrichelte Linie). Im Laufe der weiteren Befahrung nähert die Schere sich immer mehr der Rohrachse an, bis sie sich letztendlich nach ca. 115 cm wieder in der Mitte des Rohres befindet. Während dieses Befahrungsabschnittes registriert der IMU Sensor zusätzlich einen kleinen Schwimmwinkel. Diese Messwerte gehen direkt in die Auswertung mit ein und führen insgesamt zu einer Verfälschung des Dokumentationsergebnisses. Der von geoASYS erfasste Rohrverlauf entspricht somit nicht dem realen, geradlinigen Verlauf.

Aufgrund dieser Erkenntnis kann der Bewegungsverlauf einer Untersuchungseinheit in zwei unterschiedliche Teilbereiche gegliedert werden:

- Stabile Teilbereiche und
- instabile Teilbereiche.

Unter stabile Teilbereiche fallen Rohrabschnitte, in denen sich die Untersuchungseinheit entlang der mittleren Rohrachse bewegt. Bei instabilen Teilbereichen ist davon auszugehen, dass dies nicht der Fall ist. Die unterschiedlichen Bereiche sind in Abb. 8 skizziert.

Für eine qualitativ hochwertige Dokumentation der Lage von GEA ist die Strecke  $s$  von großer Bedeutung. Sie gibt an, nach welcher Entfernung vom vorangegangenen Krümmungselement die Untersuchungseinheit sich wieder in der Rohrmitte befindet. Mit Hilfe dieser Information kann die Dokumentation bzw. Modellierung von Krümmungselementen innerhalb eines Rohrverlaufes wesentlich verbessert werden.



**Abb. 8:** Darstellung von stabilen und instabilen Bereichen

Anhand der Versuche konnte des Weiteren festgestellt werden, dass die Bewegungsverläufe der einzelnen Befahrungen bei gleichbleibenden Randbedingungen (z. B. Rohraufbau) reproduzierbar sind. Je diskontinuierlicher und höher die Geschwindigkeit bei der Befahrung, desto stärker weichen die einzelnen Bewegungsverläufe voneinander ab. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der Reproduktion des Rohrverlaufes führen. Aus diesem Grund ist eine langsame und kontinuierliche Befahrung des Rohrsystems im Bereich von Krümmungselementen zu empfehlen.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Lage des Rohrsystems wie erwartet starken Einfluss auf die Bewegungsverläufe hat. Bei der Erstellung eines komplexen Bewegungsmodells müssen Verkippungen des Rohrsystems in jedem Fall berücksichtigt werden. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Bewegung ist in diesem Zusammenhang die Steifheit des Schiebeaals. Nach der Durchfahung eines Krümmungselements wirkt ein gewisser Zwang auf den Schiebeaal. Aufgrund der Steifheit des Aals kommt es dadurch zu signifikanten Auswirkungen auf den Bewegungsverlauf der Vorschubeinheit. Bei einem verkippeten Rohrsystem wirkt sich dieser Zwang wesentlich stärker auf den Bewegungsverlauf aus.

## 4. Fazit

Insgesamt kann anhand der durchgeführten Versuche abgeleitet werden, auf welchen Grundlagen ein zukünftiges Bewegungsmodell aufbauen muss. Es hat sich gezeigt, dass der Einfluss der jeweiligen Faktoren stark vom Rohraufbau abhängig ist und sich dementsprechend mehr oder weniger auf die Bewegungsverläufe auswirkt. Die kombinierte Berücksichtigung der unterschiedlichen Einflussfaktoren bildet die Basis für ein zukünftiges, komplexes Bewegungsmodell. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass folgende Faktoren berücksichtigt werden müssen:

- Winkel der Krümmungselemente,
- Verkippungen des Rohrsystems,
- Geschwindigkeit der Untersuchungseinheit,
- Bewegung bei der Hin- oder Rückmessung und

- Steifheit des Aals.

Des Weiteren muss untersucht werden, inwiefern sich die gewonnenen Ergebnisse auch auf komplexere Rohrsysteme (Kopplung von Krümmungselementen) übertragen lassen. Bei den durchgeführten Versuchen war nur ein Krümmungselement eingebaut. Für die Erstellung eines Bewegungsmodells ist es von Interesse, wie sich eine Kombination von mehreren, unterschiedlichen Krümmungs- und Geradenelementen auf den Bewegungsverlauf auswirkt. Auch die Auswirkungen von unterschiedlichen Rohrdurchmessern müssen in diesem Zusammenhang überprüft werden.

Zusammenfassend befinden wir uns bzgl. der Erweiterung des Bewegungsmodells noch bei den ersten Ansätzen und es existiert noch eine Vielzahl an Faktoren, die in Zukunft noch untersucht bzw. ermittelt werden müssen, um den komplexen Bewegungsverlauf einer Untersuchungseinheit reproduzieren zu können. Allerdings wurden mit den hier dargestellten Untersuchungen einige wichtige Ergebnisse erzielt, die uns ermutigen, die Entwicklungsarbeiten in diese Richtung weiter fortzuführen.

## Dank

Für die wertvolle Unterstützung bei der Entwicklung des Objekterkennungsalgorithmus und bei der Durchführung der praktischen Untersuchungen möchten wir uns bei der Studentin Frau Teodora Chitiboi besonders bedanken. Ebenso bedanken wir uns beim Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung für die Förderung des Projektes „Georeferenzierung von Abwasserkanälen und -leitungen“, in dessen Rahmen Teile der beschriebenen Arbeiten durchgeführt wurden.

## Literatur

- BAUER, A. (2005): Leitfaden für die Untersuchung/Datenerhebung von Grundstücksentwässerungsanlagen mit dem Untersuchungssystem ASYS (Automatisches System zur Kanalverlaufserfassung), Kassel, (unveröffentlicht)
- BAUER, A., HEISTER, H. & REINHARDT, W. (2009): geoASYS – ein System zur Dokumentation des Verlaufes von Grundstücksentwässerungsanlagen. In gwf Wasser | Abwasser 2-3/2009
- CVACI, D. & GÜNTHERT, F.W. (2007): Grundstücksentwässerungsanlagen, Zustandsdaten und Handlungsempfehlungen. In: GWA (2007) Nr. 3
- GÜNTHERT, F.W. (1999): Ursachen von Schäden in Abwasserkanälen. In: Wasser und Abfall Nr. 5
- HEISTER, H., HÜMMER, F. & REINHARDT W. (2004): Machbarkeitsstudie zum Ausbau eines Ortungssystems für Leitungsinspektion. UniBwM, Neubiberg, unveröffentlicht
- HEISTER, H. & REINHARDT, W. (2007): 3D-Dokumentation von Kanalanschlussleitungen – Ortung und Inspektion im Untergrund. In: Chesi, G.; Weinold, T. (Hrsg): 14. Internationale Geodätische Woche Obergurgl, Wichmann Wellesley, MA, Wellesley-Cambridge Press