

## **Neuere Entwicklungen zur Verlaufsbestimmung von Hausanschlussleitungen und Hauptkanälen**

### **Zusammenfassung**

Bei der Inspektion von Abwasserkanälen ist es vorteilhaft, wenn solche Verfahren angewendet werden, die außer der TV-Inspektion auch eine Ortung des Entwässerungssystems ermöglichen. Eine detaillierte Kenntnis der Lage der Abwasserleitungen und deren Einbindung in ein kommunales GIS-System erleichtert die Instandhaltungsplanung sowie die Abstimmung der Sanierungsmaßnahmen im privaten Bereich mit denen im öffentlichen Bereich. Für diese vielfältigen Zielsetzungen wurde das autonome Multisensorsystem ASYS – Automatisches System zur unterirdischen Ortungs- und Kanalverlaufsvermessung – in verschiedenen Forschungsprojekten zwischen dem Geodätischen Labor und der Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (AGIS) der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) einerseits sowie der Firma JT-Elektronik in Lindau und dem Stadtentwässerungsbetrieb der Stadt Kassel (Kasseler Entwässerungsbetrieb, KEB) andererseits entwickelt. Dabei mussten technische Aspekte und komplexe Aufgaben der 3-dimensionalen Ortung, der Inspektion sowie auch der Dokumentation erfüllt werden. Im vorliegenden Beitrag wird über den Aufbau, die Funktionalität sowie den praktischen Einsatz von ASYS berichtet. Weiterhin werden auch die Weiterentwicklungen geoASYS und hakaSYS vorgestellt sowie Verbesserungen durch zusätzliche Sensorik diskutiert.

**Schlüsselwörter:** Grundstücksentwässerungsanlagen, Dokumentation, Positionsbestimmung, Topologie, Visualisierung, Lindauer Mini-Schere, ToF-Kamera, ASYS, geoASYS, hakaSYS

### **Summary**

When inspecting the sewers, it is advantageous to use such methods, which, in addition to the TV inspection, as well allow locating the drainage system. A detailed knowledge of the location (coordinates  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) of the sewers and their integration into a municipal GIS system facilitates maintenance planning and its coordination between the private and the public sector. The autonomous multi-sensor system ASYS – an automatic system for underground tracking and for 3D capturing of network geometry and topology – was developed for various purposes in different research projects between the Geodetic Laboratory and the Geographic Information Systems Research Group (AGIS) of the Bundeswehr University Munich (UniBwM) on the one hand and the JT-Elektronik company in Lindau and the Stadtentwässerungsbetrieb of the city of Kassel (Kasseler Entwässerungsbetrieb, KEB) on the other hand. Thereby special technical aspects and complex tasks of 3-dimensional (3D) underground positioning, the inspection as well as the documentation had to be fulfilled. This paper covers details about the structure, the functionality and the practical use of ASYS. Furthermore, additional developments like geoASYS and hakaSYS will be presented as well as improvements through supplementary sensors like a Time of Flight (ToF) camera.

**Keywords:** Position of drainage system, GIS documentation, topology of private drainage system, visualisation, Lindauer Mini-Schere, ToF camera, ASYS, geoASYS, hakaSYS

## **1. Einführung**

Standen in den letzten 30 Jahren im Wesentlichen die öffentlichen Abwasserkanäle (Hauptkanäle) bezüglich Lage- und Zustandserfassung im Vordergrund der Betreiber, so rücken seit einigen Jahren auch die Grundstücksentwässerungsanlagen (GEA) bzw. Hausanschlussleitungen in Deutschland (Abb. 1), deren Länge auf das Drei- bis Vierfache des öffentlichen Kanalnetzes und somit auf ca. 1.500.000 km geschätzt wird, mehr und mehr in den Fokus der Fachleute [GÜNTHERT, 1999]. Aufgrund dieser Historie sind Lage und Zustand der öffentlichen Kanäle nicht nur bekannt, sondern auch die dabei erkannten Schäden in den letzten Jahrzehnten nachhaltig beseitigt worden. Daneben wurden auch alle

Informationen in Datenbanken und speziellen Geoinformationssystemen zur Dokumentation und Archivierung gespeichert.

Aufgrund der hierbei gesammelten Erkenntnisse wurde mehr und mehr auch die Einbeziehung der privaten GEA's bezüglich Dokumentation und Sanierung aktuell.

Nicht unwesentlich hat aber auch die Gesetzgebung hinsichtlich der GEA's zu dieser Entwicklung beigetragen, wie in BAUER *et al.* [2009] beispielhaft für das Bundesland Hessen dargelegt wurde. Neben der Erarbeitung der rechtlichen Grundlagen musste auch eine technische Umsetzung entwickelt werden. Hierbei war anzustreben, geometrische Informationen und Untersuchungsdaten der Zuleitungskanäle äquivalent zu den öffentlichen

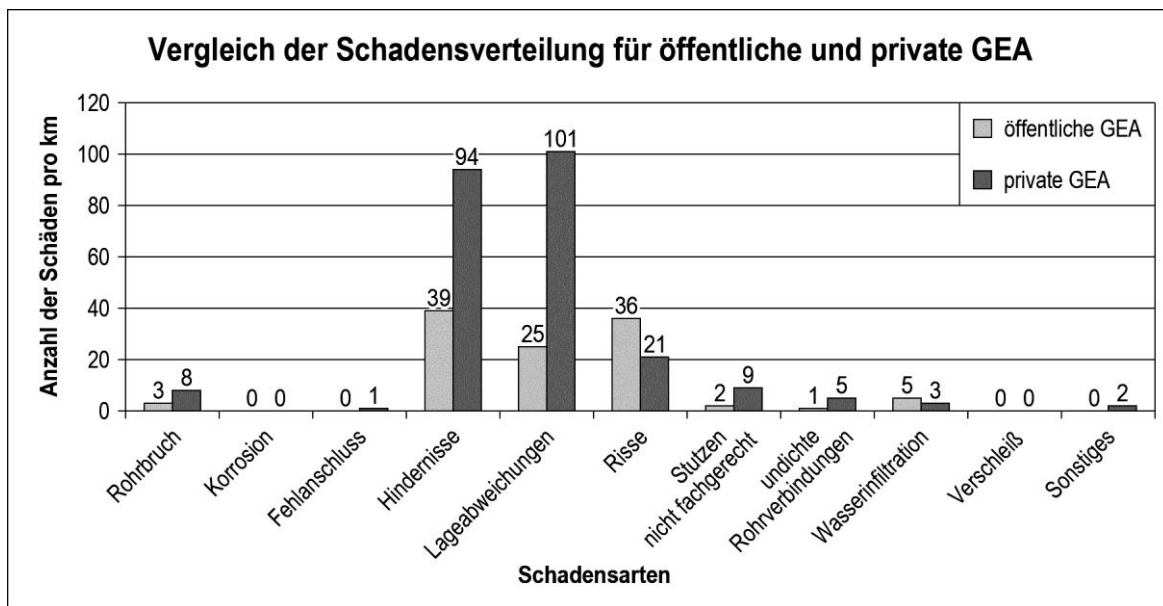


Abb. 1: Vergleich der Schadensverteilung für öffentliche und private GEA's für Steinzeug [nach HEISTER et al., 2007].

Abwasserkanälen in vorhandene Geoinformationssysteme einzubinden.

Da keine ausgereiften Systeme den o. a. Anforderungen entsprachen, wurden in verschiedenen Forschungsprojekten zwischen dem Geodätischen Labor und der Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (AGIS) der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) einerseits sowie der Firma JT-Elektronik in Lindau und dem Stadtentwässerungsbetrieb der Stadt Kassel (Kasseler Entwässerungsbetrieb, KEB) andererseits technische Lösungen diskutiert, entwickelt und zur Praxisreife intensiv erprobt. Die Zielsetzung dabei war, eine unterirdische geodätische Anschlusskanalvermessung mit der TV-Inspektion zur automatisierten Weiterverarbeitung der Daten zu verbinden.

Nachfolgend wird über die Ergebnisse dieser Entwicklungen mit dem Schwerpunkt der messtechnischen Verlaufsbestimmung von Hausanschlusskanälen berichtet; zusätzlich konnte aber auch durch Weiterentwicklung des Messmoduls ein spezielles Messsystem zur genaueren Erfassung des geometrischen Verlaufes von gekrümmten Halungen des öffentlichen Kanalnetzes erfolgreich eingesetzt und erprobt werden.

## 2. Das Ortungssystem geoASYS für Hausanschlüsse

Zur Dokumentation von Grundstücksentwässerungsanlagen (Abb. 2.) müssen diese im Rahmen der erforderlichen Genauigkeit von ca. 0,5 m – Baggerschaukelbreite – erfasst werden. Nun liegt

die Problematik darin, geeignete Messsysteme auszuwählen, da diese Leitungen mit nur ca. 1 dm Durchmesser sehr schwer zugänglich sind. Konventionelle Messtechniken sind damit nicht einsetzbar und GNSS- (z. B. GPS-) Sensoren sind heute zwar als Chips mit sehr geringen Ausmaßen erhältlich, fallen aber aus, da im Untergrund kein ausreichendes, verwertbares Signal empfangen werden kann.

Um diese Problematik zu lösen, wurde im Rahmen der o. a. Forschungsprojekte das autonome Multisensorsystem ASYS zur unterirdischen Ortungs- und Kanalverlaufsvermessung konzipiert und realisiert. Dabei standen folgende Ziele im Vordergrund:

- Aufnahme des dreidimensionalen Verlaufes der unterirdischen Hausanschlussleitungen in kleinem Durchmesser DN 100 - 150,

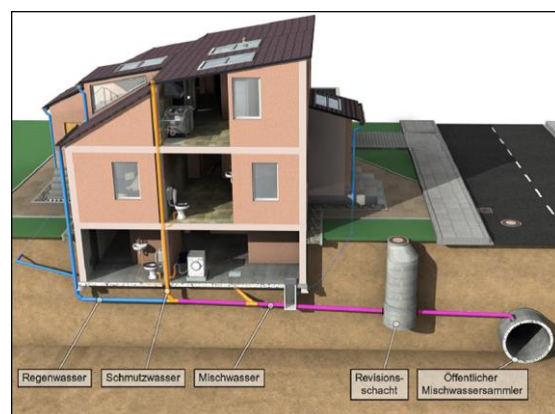


Abb. 2: Darstellung von Grundstücksentwässerungsanlagen [BAUER et al., 2009].

- Lagegenauigkeit von ca. 5 dm auf 25 m Entfernung,
- Aufnahme in Verbindung mit der TV-Inspektion,
- User Interface zur zuverlässigen Steuerung von Inspektion und Aufnahme der Leitungen,
- Robustheit gegen Umwelteinflüsse und Störungen,
- geringe Systemkosten,
- einfache Bedienbarkeit,
- exakte geometrische und topologische Beschreibung des Netzes und relevanter Einzelpunkte bzw. Leitungsabschnitte,
- Berücksichtigung von Bestandsinformationen (Attributierung),
- Möglichkeit der digitalen Weiterverarbeitung der Daten in eingeführter CAD- bzw. GIS-Software und
- Visualisierung des Netzes sowie Einbindung von vorliegenden Luftbildern oder Karten während der Messung.

Im Rahmen eines zusätzlichen Forschungsprojektes, der sogenannten „Private Public Partnership“ (PPP) [BAUER *et al.*, 2009] zwischen dem Entwässerungsbetrieb der Stadt Kassel, der Firma JT-Elektronik GmbH, Lindau, sowie dem Geodätischen Labor und der Arbeitsgruppe GIS (AGIS) der Universität der Bundeswehr München wurde das System ASYS weiterentwickelt.

Das PPP-Projekt hatte die Zielsetzung, das vorhandene System „ASYS“ in geoASYS (Unterirdische geodätische Anschlusskanalvermessung in Verbindung mit der TV-Inspektion zur automatisierten Weiterverarbeitung der Daten im Geoinformationssystem) zu transformieren. geoASYS soll dabei in der Lage sein, den Verlauf des zu untersuchenden Kanals in Echtzeit auf dem Inspektionsfahrzeug zur Unterstützung des Inspektors in einer digitalen Stadtgrundkarte darzustellen und die georeferenzierte Lage (x-, y- und z-Koordinaten) des Kanals detailliert (Leitung, Abzweig, Revisions-schacht) an ein Geoinformationssystem zu übergeben. Im GIS sollen nun alle Informationen (Zustand, Berichte, Bilder, Videos) verknüpft werden, so dass alle Daten, wie auch schon die der öffentlichen Kanäle, jederzeit und aktuell abrufbar sind. ASYS wurde in diesem Projekt als geoASYS zur Einsatzreife gebracht.

Der folgende Abschnitt enthält nun einen Überblick über das System ASYS bzw. geoASYS, seine Architektur, das Ortungsverfahren und die Führung des Operators über das Steuermodul. In einem weiteren Abschnitt wird über praktische Erfahrungen mit dem System berichtet.

## 2.1 Systemüberblick

geoASYS wurde so konzipiert, dass sowohl die komplexen Aufgaben der 3D-Ortung, der Inspektion als auch der Dokumentation erfüllt werden können. Ein schematischer Überblick des gesamten Aufbaus ist in Abb. 3 wiedergegeben.

Ortung und Inspektion bilden grundsätzlich zwei unterschiedliche Module – das Softwaremodul (ASYS) und das Hardwaremodul (Sensoren, Fahrzeug, Lindauer Schere) –, die getrennt von zwei Controllern gesteuert werden. Die Lindauer Schere beinhaltet eine Satelliten-Rotationskamera mit einer Vorrichtung zur fortlaufenden Kanal- und Abzweig-Inspektion. Außer einem Odometer (Wegimpulsgeber) sind jedoch alle Sensoren wie die Inertial Measuring Unit (IMU) in kompakter Bauweise in einer Vorschubeinheit platziert, sodass auch kleine Kanaldurchmesser von DN100 Durchmesser durchfahren werden können. Zur besseren Veranschaulichung zeigt Abb. 4 eine mobile Anlage mit der Lindauer Mini-Schere und dem integrierten Ortungsmodul ASYS.

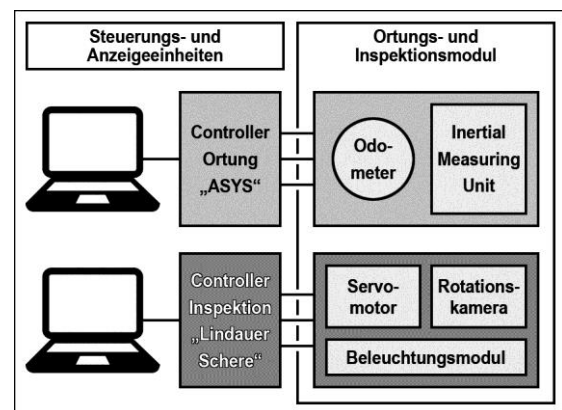


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Ortungs- und Inspektionssystems [nach HEISTER/REINHARDT, 2007].



Abb. 4: Mobile Inspektionseinheit für den Schiebetrieb [HEISTER/REINHARDT, 2007].

Für die Praxis werden unterschiedliche Systemvarianten benötigt, die sowohl Haupt- als auch Nebenkanäle aufnehmen können und in den Betriebsmodi des einfachen Schiebetriebes sowie in dem des aufwendigeren Spülbetriebes von einem speziellen Fahrwagen aus einsetzbar sein müssen. Ein solches System, eingebaut in einem speziellen Messwagen, wird in Abb. 5 vorgestellt.

## 2.2 Das Ortungsmodul

Zur unterirdischen Ortung eignen sich nur Sensorsysteme, die in der Lage sind, möglichst redundant und autonom, d.h. ohne fremde, von außen zugeführte Zusatzinformationen, eine Positionsbestimmung in vorgegebenen diskreten Schritten zu ermöglichen. Ein solches Sensorsystem ist eine Inertial Measuring Unit (IMU), die es in Kombination mit einem Wegimpulsgeber und einer bestimmten Auswertalgorithmik ermöglicht, direkt 3D-Koordinaten des Bewegungsverlaufes zu bestimmen. Die besondere Herausforderung bei der Entwicklung von geoASYS bestand darin, zum einen eine räumliche Integration in der Lindauer Mini-Schere zu ermöglichen und zum anderen eine low-cost Lösung zu erreichen, um in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen das Gesamtsystem anbieten zu können.

Als Sensor wurde deshalb der Motion Tracker XSens MTx ausgewählt, der sich bereits auf den Gebieten der Biomechanik [MOORE *et al.*, 2006] und Virtual Reality [HOL *et al.*, 2006] hervorragend bewähren konnte. Er verkörpert eine vollständige, miniaturisierte IMU (39 x 54 x 28 mm) (Abb. 6), die neben drei Vibrationskreiseln und drei Beschleunigungssensoren zusätzlich drei Magnetfeldsensoren enthält. Die Eigenschaften des MTx können wie folgt zusammengefasst werden:

- Datenausgabe:
  - 3D-Orientierung (Eulerwinkel und Quaternionen),
  - 3D-Drehraten durch Vibrationskreiselmessungen,
  - 3D-Beschleunigungsmessungen,
  - 3D-Magnetfeldmessungen,
- Genauigkeit der Ruhelage: ca. 1°,
- Genauigkeit während der kinematischen Bewegung: ca. 3°,
- Drift der Drehraten während der Bewegung: ca. 1°/Minute,
- Messfrequenz: 25 - 512 Hz,
- Schnittstelle: RS 485, erlaubt maximale Kabellänge von 1.200 m,
- Softwaremodule/API zur Einbindung in eigene Applikationen.



**Abb. 5:** Inspektionsfahrzeug für den Spülbetrieb [HEISTER/REINHARDT, 2007].  
oben: Einbau-Controllersysteme.  
unten: Fahrwagen mit Satellit für Inspektion und Ortung.

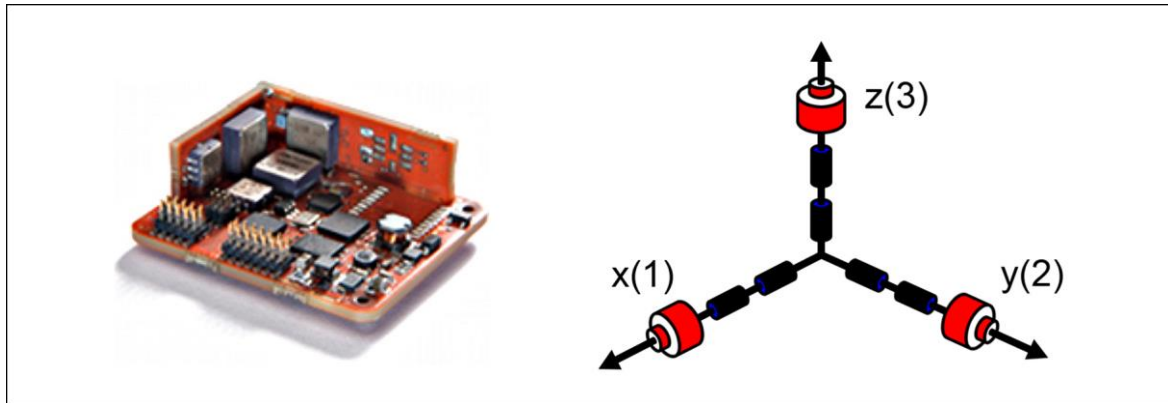


Abb. 6: XSens MTx [HEISTER/REINHARDT, 2007].

Eigene Untersuchungen und umfangreiche Tests unter Einbeziehung der typischen Bewegungsabläufe bei der Kanalinspektion führten zu einer Abschätzung der Messunsicherheit für die Richtung von  $< 1,5^\circ$  [HEISTER et al., 2004]. Zur Verbesserung und Stabilisierung der Koppelnavigation können noch visuelle Zusatzinformationen aus der Inspektion über den Kanalverlauf in einem speziellen Auswertalgorithmus integriert werden, so dass die Forderungen nach 5 dm Genauigkeit auf eine Inspektionsdistanz von ca. 25 m erreicht werden kann. Einen schematischen Überblick über die Berech-

nung der Ortungsinformation und weiter folgende Schritte gibt Abb. 7.

Als Schnittstelle zwischen dem Ortungsmodul und dem Anwender/Inspekteur wurde das Steuermodul entwickelt. Der folgende Abschnitt beschreibt diese Softwarekomponente.

### 2.3 Das Steuermodul

Die Bedienoberfläche der Steuersoftware kennzeichnet sich durch eine intuitive, übersichtliche Struktur aus, um den Inspektions- und Messvor-

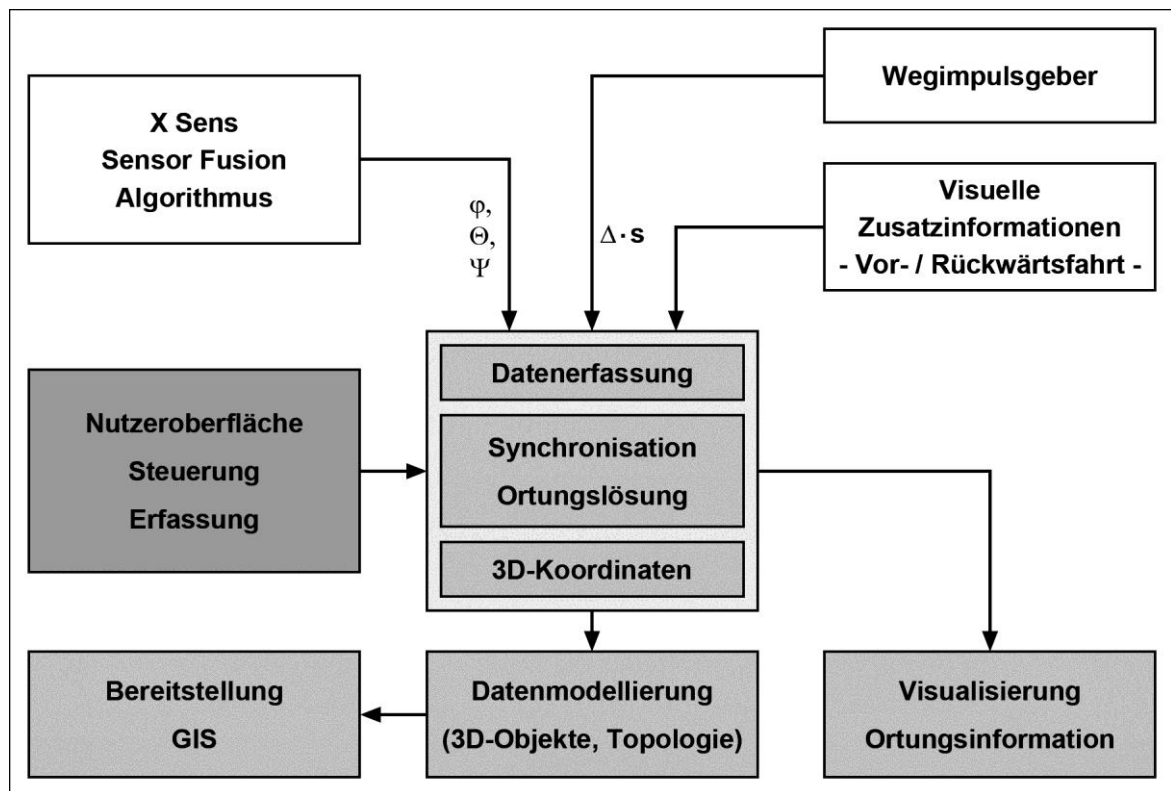


Abb. 7: Berechnung der Ortungsinformation, Datenmodellierung und -übergabe [nach HEISTER et al., 2007].

gang soweit wie möglich von zusätzlichen Eingaben, Steuerbefehlen und anderweitigen Manipulationen zu entlasten. Während die eigentliche Ortungs-Software kontinuierlich im Hintergrund läuft, kann sich der Inspekteur voll auf die Kamerasteuerung und die notwendigen Eingaben zur Schadensdokumentation konzentrieren. Währenddessen wird in Echtzeit der 3D-Verlauf dargestellt, so dass jederzeit zum einen der topologisch korrekte Aufbau des Hausanschlussnetzes, zum anderen aber auch die aktuelle Position der Kamera visuell verfolgt werden kann.

Mit der Darstellung von Geometrie und Topologie auf der Stadtgrundkarte in Echtzeit (Abb. 8) wird dem Inspekteur eine Orientierungshilfe gegeben. Somit wird ihm durch die Darstellung der Position der Inspektionseinheit der Auftrag ermöglicht, eine Anschlussleitung genau bis zur Grundstücksgrenze oder bis zur ersten Hausaußenwandinnenkante zu untersuchen. Er wird auch in die Lage versetzt, im Rahmen der Inspektion die jeweilige Leitung einem Objekt (Grundstück, Haus,

Straßenablauf) zuzuordnen. Diese Zuordnung ist oftmals die Grundlage für den weiteren Umgang mit der inspizierten Leitung.

Ferner ermöglichen die automatisch nummerierten Messpunkte die Zuordnung von Knickpunkten, Abzweigen, Schadstellen oder Endpunkten. Eine spätere Übergabe an die Inspektionssoftware, wo je nach Anforderungen eine ausführlichere Attributierung der Schadensaufnahme möglich ist, z. B. nach den Vorgaben von ISYBAU (siehe unter <http://de.wikipedia.org/wiki/Isybau>), kann über entsprechenden Datenaustausch erfolgen.

Nach Abschluss der Inspektionsarbeiten kann sowohl eine tabellarische und graphische Ausgabe der geoASYS-Dokumentation als auch ein Datenexport in weiterführende CAD-/GIS-Produkte erfolgen.

## 2.4. Tests und praktische Anwendungen

In umfangreichen Labortests konnte die hohe Genauigkeit des Systems nachgewiesen werden [HEI-

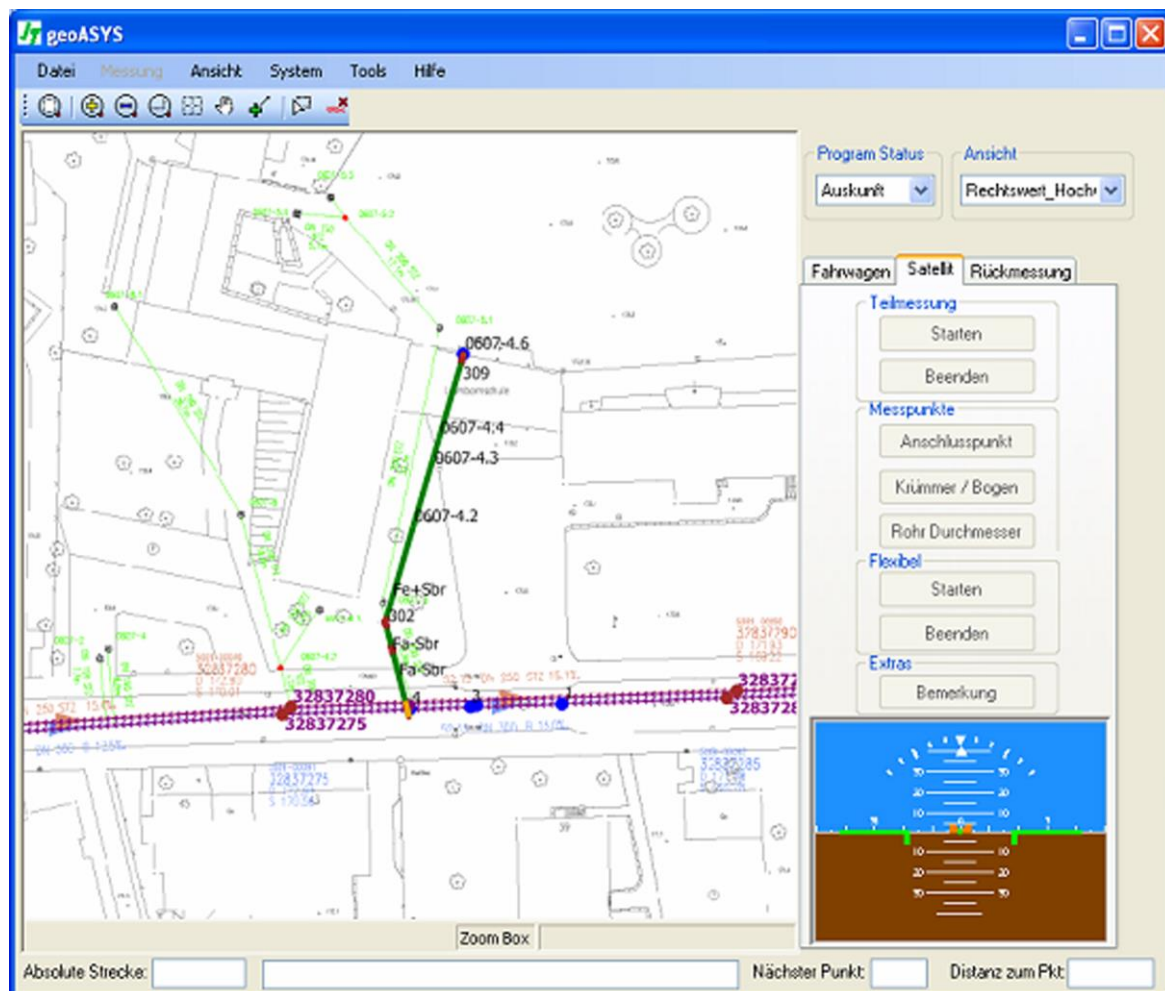


Abb. 8: geoASYS – Benutzeroberfläche [BAUER et al., 2009]

STER et al., 2004]. Bei Praxistests zeigte sich jedoch, dass in einzelnen Fällen, z. B. bei verschmutzten Rohren, stärkerer Druck auf das System ausgeübt werden muss, um Hindernisse zu überwinden, wodurch sich die Lindauer Schere nicht immer parallel zur Kanalachse bewegt, sondern z. B. schräg dazu steht (Abb. 9).

Dies führte dazu, dass zusätzlich zur Messung im „Vorwärtsbetrieb“ die Messung beim Zurückziehen des Systems zur Verbesserung der Geometrie verwendet wird, da in diesem Fall die optimale Lage des Systems weitgehend gewährleistet ist.

Zur Verifizierung der Genauigkeit beim Einsatz von geoASYS wurden im Vorfeld die in einem Testgebiet liegenden zugänglichen Entwässerungselemente topographisch vermessen. Die Vermessungsdaten der Entwässerungselemente (z. B. Revisionsschächte) wurden in die digitale Stadtgrundkarte eingepflegt. Durch diese Vorgehensweise wurde jede vor Ort mit geoASYS durchgeführte Vermessung während der Inspektion des Anschlusskanals überprüfbar. Durch ständige Anpassung der Hard- und Software sowie der Kalibrierung des Systems konnte eine ständige Verbesserung bei der Verlaufsmessung erreicht werden.

Betrachtet man die ersten 20 Meter einer Vermessung, so kann man hier sogar feststellen, dass die Messdaten mit der tatsächlich angenommenen Lage des Anschlusskanals häufig punktgenau übereinstimmen. Die laufende Verbesserung der Vermessungsqualität, aber auch intensivere praktische Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass das formulierte Ziel von  $\pm 50$  cm in der x- und y-Achse und  $\pm 5$  cm in der z-Achse [BAUER et al., 2009] auch über die ersten 20 Meter hinaus erreicht wurde.

### 3. Das Ortungssystem hakaSYS für Hauptkanäle

Eine lage- und höhenrichtige Dokumentation von Haltungsverläufen (Verbindungsstrecke eines Abwasserkanals zwischen zwei Schächten von Hauptkanälen) ist Voraussetzung für unterschiedliche Maßnahmen innerhalb von Kanalnetzen. Dies wird umso bedeutender, wenn an vorhandenen Haltungen weiterführende Netzverdichtungsmessungen im Bereich der Grundstücksentwässerungsanlagen erfolgen sollen. Wie bereits erwähnt, haben die Netzbetreiber in den letzten Jahrzehnten die Datenqualität der Kanalnetze durch terrestrische Vermessung ihrer Schachtbauwerke gesteigert. Dabei wurden sämtliche Zu- und Abläufe zentimetergenau in Lage und Höhe bestimmt. Zunehmend werden auch Scanverfahren eingesetzt, um größere Bauwerke de-

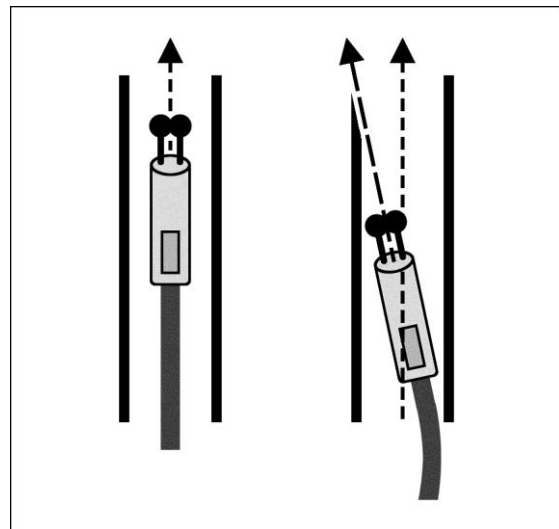


Abb. 9: Optimale Lage des Systems (links) und „schräge“ Lage (rechts) [nach BAUER et al., 2009].

tailliert zu modellieren. Dagegen entsteht der Verlauf in Lage und Höhe einer Haltung meist durch CAD-Konstruktion zwischen den bekannten Schachtpunkten.

Im Idealfall einer geradlinigen Verbindung zwischen zwei Schächten führt dies zu ausreichenden Ergebnissen. Bei kreis- oder bogenförmigen Verläufen reichen die Informationen – meist aus analogen Planunterlagen entnommen – jedoch nicht mehr aus, um einen lagerichtigen Verlauf zu konstruieren. Die so entstandenen Unsicherheiten können mehrere Meter betragen.

#### 3.1 Systemüberblick

Die Vorgabe bestand darin, ein Messsystem zu entwickeln, im Folgenden hakaSYS genannt, das als autonomes System in der Lage ist, den geometrischen Verlauf von Haltungen sowie anderen unterirdisch, nicht begehbaren Rohrleitungen ab einem Durchmesser DN250 (25 cm) in Lage und Höhe automatisiert zu vermessen. Die geforderte Genauigkeit beträgt dabei eine Haltungsbreite. Ein Fahrwagen mit Messsensorik durchfährt dabei die Kanalsohle zwischen zwei lage- und höhenmäßig bekannten Punkten und erfasst in diskreten Punkten ihren Verlauf. Der Operateur verfolgt den Fortgang in Echtzeit und steuert den Fahrwagen über einen Controller. Während der Erfassung können Ereignispunkte gesetzt werden, die z. B. auch eine georeferenzierte Schadensdokumentation ermöglichen [HÜMMER et al., 2013].

Abbildung 10 zeigt schematisch den Messablauf. Da der Fahrwagen aufgrund seiner Kabelverbindung zu einem Inspektionsfahrzeug ohnehin

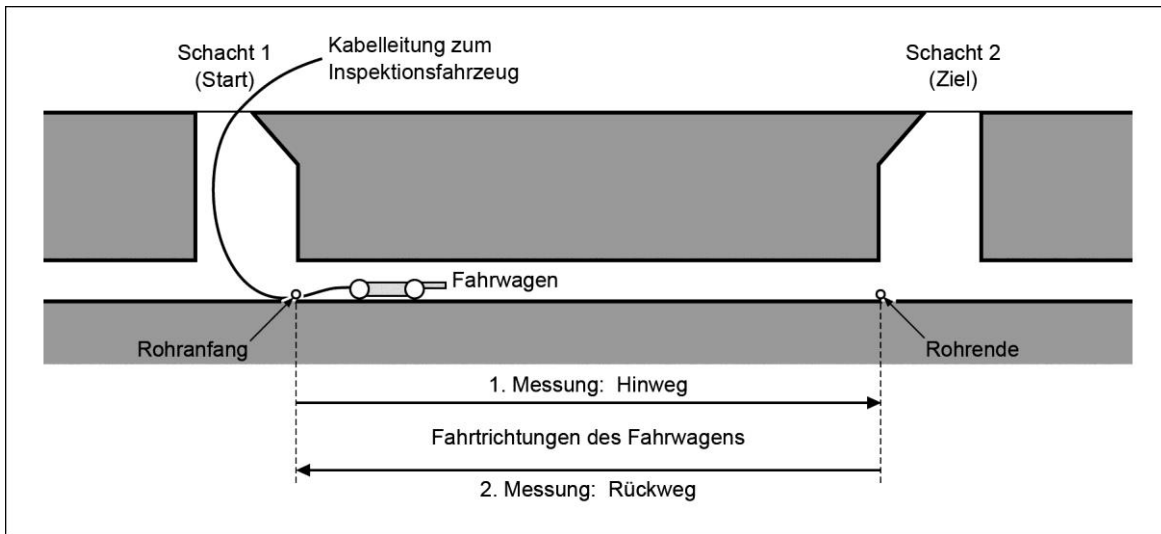


Abb. 10: Hin- und Rückmessung zwischen zwei Schächten [nach HÜMMER et al., 2013].

zum Ausgangsschacht zurückkehren muss, stehen sowohl eine Hin- als auch eine Rückmessung für die Vermessung der Haltung als Beobachtungsdatensatz zur Verfügung. Der Haltungsverlauf darf dabei geknickt oder bogenförmig verlaufen.

Ein solcher Fahrwagen (Abb. 11), wie er in der Kanalinspektion eingesetzt wird, verfügt über eine dreh- und schwenkbare Kamera mit Beleuchtungseinrichtung und je nach Einsatzgebiet entsprechender Bereifung. Die Bereifung des Fahrwagens muss dem Querschnitt so angepasst werden, dass einerseits eine Führung in der Mitte des Profils sichergestellt ist und andererseits ein Klettern am Haltungsrand vermieden wird. Damit werden Rollbewegungen des Fahrwagens minimiert. Der Fahrwagen ist über eine Kabelleitung mit Strom-, Steuer- und Datenleitungen mit dem in Schachtnähe befindlichen Inspektionsfahrzeug verbunden. Die Messsensorik befindet sich im Fahrwagengehäuse, welches auch das Body-Koordinatensystem repräsentiert.

Die Lage des Messsystems zum Fahrwagen wurde entsprechend kalibriert. Dies ist für jeden Fahrwagentyp notwendig, um ihn anhand bekannter Bezugspunkte so in der Haltung positionieren

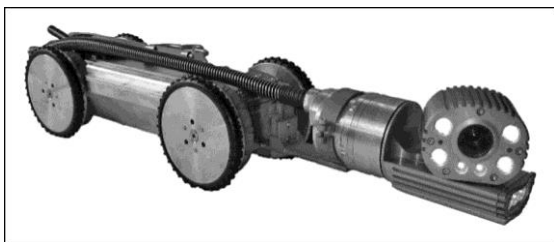


Abb. 11: JT-Fahrwagen mit integrierter Sensorik [HÜMMER et al., 2013].

zu können, dass ein Bezug zum Haltungsanfang (koordinatenmäßig bekannt) hergestellt werden kann. Ferner muss in diesem System die Position der Kamera bekannt sein, da die Positionierung des Fahrwagens vor aufzunehmenden Punkten über das Kamerabild erfolgen muss.

### 3.2 Das Ortungsmodul

Die Bestimmung der Positionen erfolgt wie im System geoASYS nach dem Prinzip der Koppelnavigation. Das bereits vorhandene Ortungsmodul wurde jedoch um einen einachsigen fiberoptischen Kreisel (FOG) der Firma KVH (Abb. 12) erweitert. Im Vergleich zu MEMS-Sensoren (Micro Electro Mechanical Systems) weist ein optischer Kreisel, der auf dem Sagnac-Effekt basiert, eine deutlich höhere Genauigkeit bei der Bestimmung der Drehraten auf und ist unempfindlich gegen äußere Stör-



Abb. 12: Ortungsmodul DSP-3100 der Fa. KVH [HÜMMER et al., 2013].



einflüsse. Die um das weiße Rauschen bereinigte Auflösung ist kleiner als  $0,0005^\circ$  bei einer Abtastfrequenz von 1.000 Hz. Labortests haben gezeigt, dass bei Berücksichtigung der Erddrehraten in Abhängigkeit von der geographischen Breite die verbleibenden Driften unter  $1^\circ/\text{Stunde}$  betragen. Mit diesem Sensor kann die Bestimmung der Richtungsänderung im geforderten Einsatzszenario praktisch als fehlerfrei betrachtet werden, da andere äußere Fehlereinflüsse überwiegen. Für die Datenkommunikation mit dem Sensor wurde ein eigenes Erfassungsmodul entwickelt, das die Messdaten zuverlässig aufzeichnet. Dies war notwendig, da der Sensor lediglich die Drehraten als Datenpaket zu 5 Byte mit konstanter Frequenz von 1.000 Hz ausgibt. Als Schnittstelle zur seriellen Datenübertragung wird wieder eine RS 422 eingesetzt. Damit sind die geforderten Leitungslängen von bis zu 800 m möglich.

Zur Bestimmung der Weglänge werden die Dreh-Impulsgeber der Versorgungs- und Datenleitung verwendet. Die Wegänderungen stehen über eine eigene Software-API zur Verfügung und werden im Ortungsmodul erfasst. Um den Roll- und Nickwinkel des Fahrwagens zu bestimmen, wird der aus geoASYS bekannte Sensor der Firma XSens eingesetzt. Mit diesen Sensoren stehen sämtliche für eine präzise Koppelnavigation benötigte Beobachtungsgrößen (Streckeninkrement und drei Rotationswinkel) über den gesamten Messweg permanent zur Verfügung.

Voraussetzung für eine Berechnung der Koppelnavigation in einem Echtzeitsystem ist eine kontinuierliche, zeitsynchrone und zuverlässige Datenerfassung aller Sensoren. Die eingehenden Beobachtungen werden fortwährend anhand von Bedingungen auf Plausibilität geprüft. Dabei werden einerseits die Statusmeldungen der Sensoren ausgewertet sowie Checksummen der Datenpakete geprüft. Auftretende Fehler werden registriert und dürfen vorgegebene Schwellenwerte nicht überschreiten. Das Fehlermanagement muss so abgestimmt sein, dass eine vertretbare Entscheidung getroffen werden kann, ab welchem Zeitpunkt die Messung softwareseitig zu beenden ist. Diese Entscheidung darf jedoch nicht zu streng getroffen werden, da eine Wiederholung der Messung einen nicht unerheblichen zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand bedeutet. Mittels diverser Labor- und Praxistests konnten diese Parameter empirisch bestimmt werden.

Es liegt nahe, dass sich die Festlegung der Positionsrate nach dem Sensor mit der geringsten Messfrequenz richten muss. Die Beobachtungen des FOG- und des XSens-Sensors werden gepuffert und für die Berechnung der Koppelnavigation der

Fahrwagenpositionen bereitgestellt. Liegt eine Wegänderung vor, wird diese mit einer Frequenz von 10 Hz berechnet. Die schon vorhandenen Module aus dem System geoASYS wie die Konfiguration der Weggebersysteme, die Verwaltung von Fahrwagentypen inklusive ihrer Translationen von Sensorpositionen im Fahrwegensystem und die Kalibrierung des Nickwinkeloffsets zum Horizont begünstigte die gesamte Entwicklung und Implementierung. Um die Messprozedur zu starten, müssen die Koordinaten des Rohranfangs- und Rohrendpunktes aus dem Steuermodul übergeben werden und die im Fahrwegensystem gemessenen Beobachtungen in das Landessystem überführt werden. Hierzu wird der Fahrwagen über einen definierten Punkt am Rohranfangspunkt positioniert.

Da diese Softwareprozeduren bereits in geoASYS vorhanden sind, musste die bestehende Berechnung nur angepasst werden. Um nun den Haltingsverlauf selbst neu zu bestimmen, müssen die Beobachtungen des FOG-Sensors lediglich als Gierwinkel (Richtungswinkel) für jeden diskreten Koppelnavigationspunkt eingeführt werden. Das benötigte Streckenelement liefert der Weggeber. Da es sich bei dem eingesetzten FOG um einen Einachs-Sensor handelt, müssen die Beobachtungen um den Roll- und Nickwinkel des Fahrwagens korrigiert werden. Beim Einbau beider Sensoren wurde berücksichtigt, dass sich beide Sensoren in einer (horizontalen) Ebene befinden. Die dann in Echtzeit im Landeskoordinatensystem berechneten Fahrwagenpositionen werden dem Steuermodul per Event übermittelt.

### 3.3 Das Steuermodul

Das Steuermodul mit graphischer Oberfläche wurde als eigenständige Softwareapplikation neu entwickelt. Abbildung 13 zeigt die Oberfläche mit hinterlegter Katasterkarte und Fachinformationen des Kanalbestandes. Die zu vermessenden Haltungen werden importiert und sind in blauer Farbe erkennbar. Da der gekrümmte Verlauf vor Beginn der Vermessung noch unbekannt ist, verläuft die Verbindung zwischen Haltungsanfang und Ende zunächst gerade.

Für den Start einer Vermessung ist nach Angabe des Fahrwagentyps lediglich die Auswahl der Haltung notwendig, an dessen Anfangspunkt sich der Fahrwagen befindet. Nach dem Starten der Vermessung sind keine weiteren Benutzereingaben mehr erforderlich. Lediglich das Erreichen des Haltungsendpunktes am Ende der Hinfahrt und das Erreichen des Ausgangspunktes am Ende der Rückfahrt wird per Knopfdruck bestätigt. Der Operateur kann den vorläufigen Verlauf der Hin- und Rück-



**Abb. 13:** Software zur Vermessung von Haltungen mit Hintergrundkarte des vorhandenen Bestandes [HÜMMER et al., 2013].

fahrt live in der Karte verfolgen. Da als Anfangsrichtung der Richtungswinkel der geradlinigen Haltung verwendet wird, ist der zunächst dargestellte Verlauf noch nicht lagerichtig, sondern zur wahren Anfangsrichtung verdreht. Dennoch wurde von Seiten des Kunden Wert auf eine (falsche) Echtzeitdarstellung gelegt, da so bereits Richtungsänderungen während der Befahrung mit dem Bild der Inspektionskamera verglichen und optisch auf Plausibilität geprüft werden können.

Mit Abschluss der Rückfahrt werden die Positionen der Hin- und Rückmessung gemittelt und anschließend auf die bekannten Haltungsanfangs- und -endpunkte nach Lage und Höhe getrennt transformiert. Hierdurch wird sichergestellt, dass die durch das Messsystem hakaSYS neu bestimmten Positionen an die bekannten Ausgangspunkte anknüpfen und Klaffungen und Mehrdeutigkeiten vermieden werden. Der Haltungsverlauf beginnt und endet stets an den vorgegebenen Knoten der Schachtbauwerke. Da die Haltungsenden als fehlerfrei eingeführt werden, führen Fehler bei der Weglängenmessung zu einer Dehnung oder Stauchung der vermessenen Haltungspositionen. Fehler in der Richtungsmessung wirken sich direkt auf die Querabweichung aus, wobei mit den größten Abweichungen in der Lage in der Mitte der Haltung gerechnet werden kann. Aufgrund der Weggeberauflösung von einem Zentimeter (ein Puls pro cm) entstehen pro Haltung sehr viele Stützpunkte. Diese

sind zur Speicherung der Haltung in Bestandsdatenbanken nicht geeignet, zumal diese Systeme den Haltungsverlauf als Polylinien verwalten und Stützpunkte nur bei Vorliegen eines Knickpunktes geführt werden sollen. Es erfolgt deshalb ein Ausdünnen der Stützpunkte nach dem Douglas-Peucker-Algorithmus mit einer Scheitelhöhe von 3 cm. In einem letzten Schritt werden die bestimmten Haltungen in den Formaten ESRI-Shape und DXF im Projektverzeichnis abgelegt. Für nachträgliche Analysen stehen als Datensatz die Rohdaten der Hin- und Rückmessung, das Ergebnis der Mittelbildung und Transformation sowie das Ergebnis der ausgedünnten Haltung zur Verfügung.

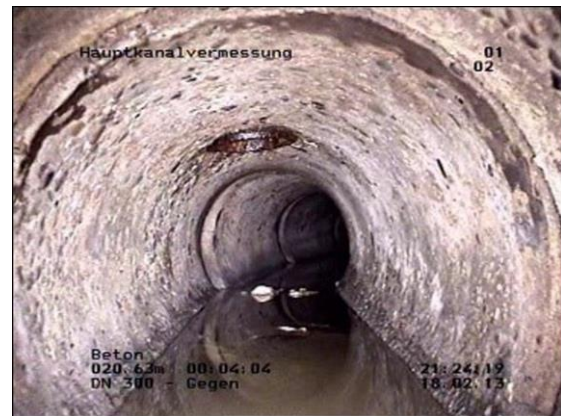
### 3.4 Praxistest

Nachdem die ersten Tests auf einem Versuchsgelände mit vermessener Referenzstrecke positiv abgeschlossen werden konnten, wurde das System verschiedenen Praxistests unter Realbedingungen unterzogen. Das Testgebiet enthielt mehrere Haltungen mit Kreisbögen sowie leicht gebogenen Haltungen.

Die Abbildungen 14 und 15 zeigen beispielhaft die Krümmungen untersuchter Ei- und Kreisprofile. Erfreulich war, dass die Rüstzeiten durch die Vermessung nicht wesentlich erhöht werden und die Fahrwegengeschwindigkeit im Vergleich zur regulären Inspektion nicht geändert werden musste.



**Abb. 14:** Eiprofil DN 700/1050  
[HÜMMER et al., 2013].



**Abb. 15:** Kreisprofil DN 7800  
[HÜMMER et al., 2013].

Nach der Positionierung des Fahrwagens im Schacht können pro Minute durchschnittlich 10 m Haltungsverlauf befahren werden. Bei einer durchschnittlichen Haltungslänge von 60 m beträgt die Dauer für die Hin- und Rückfahrt weniger als 15 Minuten. Die Echtzeitvisualisierung vorläufiger Ergebnisse erwies sich im praktischen Einsatz ebenso vorteilhaft, da hierdurch die Entscheidung des Operators zur Durchführung einer Wiederholungsmessung, ggf. dem Wechsel der Fahrwagenbereifung oder einer vorausgehenden Rohrreinigung bis hin zum Abbruch der Vermessung, erleichtert wird.

### 3.5 Testergebnisse

Durch Auswertung der Hin- und Rückmessung sowie der gemittelten Ergebnisse konnte nachgewiesen werden, dass die maximalen Abweichungen in der Mitte einer Haltung bei Haltungsängen bis 120 m weniger als 1 dm aufweisen. Ebenso konnte die Kompensation von systematischen Fehlern durch die Mittelbildung von Hin- und Rückmessung bestätigt werden. Bezüglich der Reproduzierbarkeit mehrfach befahrener Haltungen liegen die Lösungen innerhalb eines Bandes mit maximaler Breite von 15 cm. Diese Streuung resultiert nicht nur aus der Genauigkeit des Messsystems selbst, sondern auch aus den Unsicherheiten hinsichtlich Positionierung des Fahrwagens und der Weglängenmessung über das Versorgungskabel. Die sehr gute Reproduzierbarkeit bei Mehrfachbefahrungen bedeutet im Ergebnis, dass eine einzige Befahrung aus Hin- und Rückmessung ausreichend ist, um den Haltungsverlauf im vorgegebenen Genauigkeitsrahmen zu bestimmen.

Die nahezu driftfreie Erfassung der Richtungsänderungen ermöglicht es, auch geradlinige und gering gekrümmte Haltungsverläufe gut zu erfassen. Dies bedeutet, dass Übergänge zwischen

Krümmungen und Geraden gut identifiziert werden können. Beispielhaft zeigt dies die Vermessung einer Haltung (Abb. 16), deren Verlauf anfangs bis zur Straßenmitte gebogen ist und anschließend in einen geraden Verlauf übergeht. In den Planunterlagen war diese Haltung als Kreisbogen mit anschließender Gerade in blauer Farbe verzeichnet. Die Stützpunkte in roter Farbe verdeutlichen, dass die neu bestimmte Haltung (grün) in geraden Abschnitten keine Scheitelhöhen über 5 cm enthält. Die Querabweichung zwischen Vermessung und Bestand beträgt im Maximum 3,4 m. Dies ist eine Größenordnung, die auch bereits erheblichen Einfluss auf die geometrische Größe der Haltungsänge selbst hat: Die im Bestand nachgewiesene Länge wurde mit 61,30 m geführt, aus der Vermessung ergibt sich eine rechnerische Länge der Haltung von 57,07 m. Die Differenz in der Haltungsänge beträgt 7%. Bei Sanierungsmaßnahmen, aber auch bei Netzerweiterungen oder Baumaßnahmen in unmittelbarer Nähe führen diese Fehler im Bereich mehrerer Meter zu unerwarteten Kostensteigerungen. Mit dem neuen System hakaSYS können diese zukünftig vermieden werden.

## 4. Zusätzliche Sensorik zur Verbesserung der Messgenauigkeit

Wie bereits mehrfach erwähnt, wird die Genauigkeit aber auch die Zuverlässigkeit der Ortungssysteme ASYS und geoASYS durch unterschiedliche äußere Einflüsse beeinträchtigt. Um diese zu detektieren oder gar zu kompensieren, wurde über die Implementierung von zusätzlicher Sensorik nachgedacht. Hierbei wurde als zweckmäßiger Sensor eine Time of Flight (ToF) Kamera als sinnvoll erachtet, da sie visuelle aber auch messtechnische Eigenschaften besitzt. Nachfolgend wird über Unter-

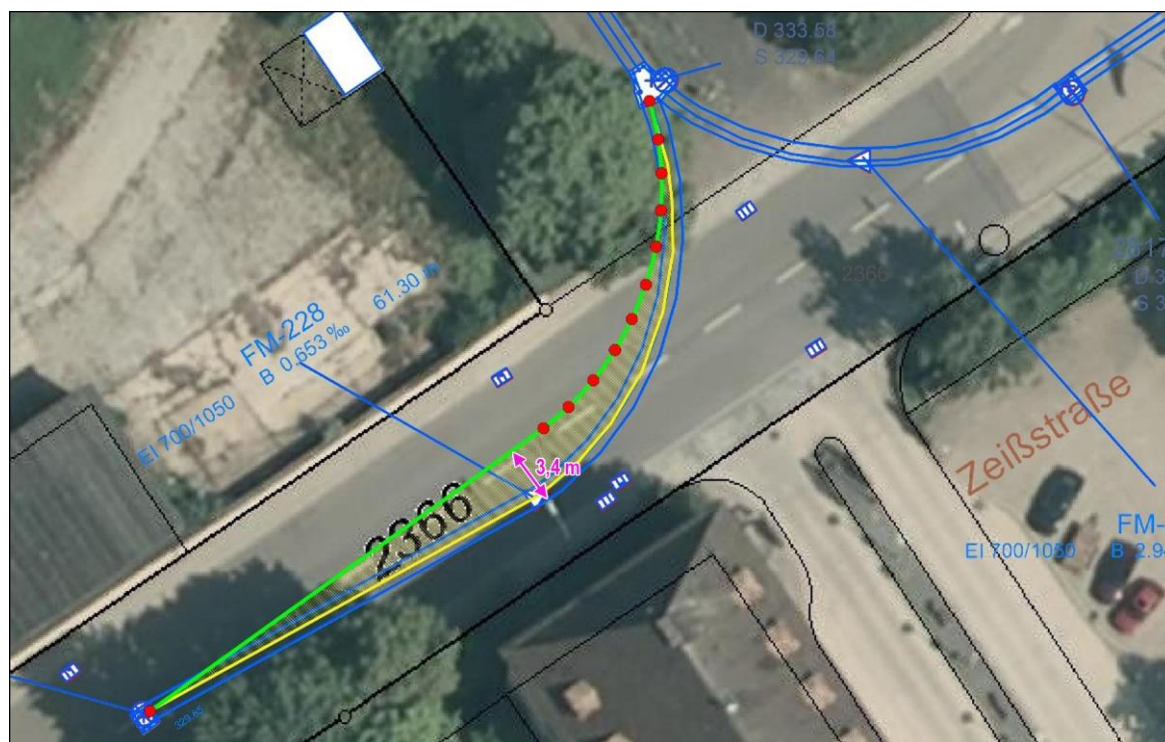


Abb. 16: Haltungsbestand (blau), Vermessung (grün), ausgedünnte Stützpunkte (rot) [HÜMMER et al., 2013].

suchungsergebnisse bezüglich der vorgegebenen Zielsetzung – eine Verbesserung der Messgenauigkeit – berichtet.

#### 4.1 Grenzen des bestehenden Messkonzepts und deren Ursachen

Die Einsatzbedingungen für die oben genannten Ortungssysteme – im Untergrund in durchschnittlich 10-20 cm großen Rohrsystemen – stellen aus geodätischer und messtechnischer Sicht eine Herausforderung dar. Wie bereits erwähnt, beträgt die geforderte Genauigkeit ca. 0,5 m in der Lage und 0,1 m in der Höhe. Konventionelle geodätische Messtechniken wie GPS, Tachymetrie oder Laser-scanning sind zur Dokumentation von Grundstücks-entwässerungsanlagen grundsätzlich nicht geeignet.

Die Verarbeitungsprozesse der Ortungssysteme geoASYS und hakaSYS stützen sich aus diesem Grund, wie vorangegangen beschrieben, auf Informationen von zwei Sensoren, einem Odometer (Wegstreckengeber) und einem miniaturisierten MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) inertialen Navigationssystem (INS) [HEISTER/REINHARDT, 2007; STRIEGL et al., 2010, 2012]. Da bei der Vermessung von Rohrsystemen nur wenige Möglichkeiten zur Kontrolle der Messergebnisse bestehen, können sich die Ortungssysteme aktuell nur

auf diese beiden Sensoren stützen. Unter den spezifizierten Rahmenbedingungen liefern diese Ortungssysteme Messergebnisse in der geforderten Genauigkeit. Die steigenden Anforderungen durch die Anwender, wie die Befahrung von längeren und komplexeren Rohrsystemen oder die Erhöhung der Lage- bzw. Höhengenaugigkeiten, zeigen bei den dargestellten Messkonzepten Grenzen auf.

Im Folgenden werden kurz die beiden wichtigsten Problemstellungen bei der Vermessung von GEA's bzw. Hauptkanälen vorgestellt:

##### Drifteffekte

Bei den Drehratensensoren des INS treten sogenannte „Drift“-Effekte auf. Diese haben eine Größenordnung von ungefähr einem Grad pro Minute und wirken sich direkt auf die Winkelmessungen und damit auch auf die Genauigkeit der Dokumentation des Rohrverlaufes aus. Mit Hilfe der vorgestellten Messkonzepte und Algorithmen konnten diese „Drift“-Effekte jedoch bisher gut kompensiert werden [STRIEGL et al., 2010].

##### Schwimmwinkel

Eine weitere Problemstellung ergibt sich durch die Bewegung der Inspektionseinheit innerhalb des Rohres. Im bisher angenommenen Bewegungsmodell folgt die Inspektionseinheit der mittleren Achse des jeweiligen Rohrelementes. In der Praxis

hat sich aber gezeigt, dass beispielsweise durch Hindernisse innerhalb des Rohres (z.B. Verschmutzungen) oder durch spezielle Manöver des Operateurs die Lage der Inspektionseinheit von der mittleren Rohrachse richtungsmäßig abweicht (siehe Abb. 9). Diese Abweichung der Orientierung der Inspektionseinheit von der mittleren Rohrachse wird als Schwimmwinkel bezeichnet. Diese Schwimmwinkel werden direkt vom INS erfasst und führen zu Fehlorientierungen im Messprozess und beeinflussen somit erheblich die Qualität des dokumentierten Rohrverlaufes in der Lage sowie in der Höhe. In Abbildung 17 sind beispielhaft die Auswirkungen von Schwimmwinkeln auf den dokumentierten Rohrverlauf skizziert.

Schwimmwinkel können nicht mit der bestehenden Messkonfiguration erfasst werden, sondern nur durch das Messkonzept minimiert werden (s.a. Abschnitt 2.). Um sie aber zu bestimmen und somit Korrekturansätze zu modellieren, müssen zusätzliche Sensoren wie beispielsweise eine Time of Flight (ToF) Kamera eingesetzt werden.

#### 4.2 ToF-Kamera zur Bestimmung von Schwimmwinkeln

In STRIEGL [2016] wurde unter Laborbedingungen untersucht, ob mittels Aufnahmen einer ToF-Ka-

mera in einem Rohrsystem Schwimmwinkel grundsätzlich bestimmt werden können und mit welcher Genauigkeit diese Bestimmung erfolgen kann.

Gerader letzter Punkt ist von Interesse, da schon kleine Winkelfehler, beispielsweise bei der Bestimmung von Bögen, Auswirkungen auf die Genauigkeit haben können. Dies soll kurz anhand eines kleinen Rechenbeispielles demonstriert werden: Ein Fehler bei der Bestimmung eines Bogenwinkels von nur  $2^\circ$  führt nach einer darauf folgenden Befahrung eines geraden Rohrelements von 14 m Länge schon zu einer Lageabweichung von 0,5 m. Bei der Befahrung von komplexen und räumlich ausgedehnten GEA's kann die geforderte Lagegenauigkeit so sehr schnell überschritten werden.

Im vorliegenden Fall wurde die ToF-Kamera SwissRanger 4000 der Firma Mesa Imaging (Abb. 18) zur Aufnahme einer 3D-Punktwolke innerhalb des Rohres verwendet.

Die Bestimmung des Schwimmwinkels anhand der aufgenommenen Punktwolke erfolgt dann in folgenden Schritten:

##### 1. Bestimmung der Rohrachse aus der aufgenommenen Punktwolke

Die Rohrachse kann beispielsweise mittels des RANSAC (random sample consensus) Algorithmus [BOLLES/FISCHLER, 1981] oder der

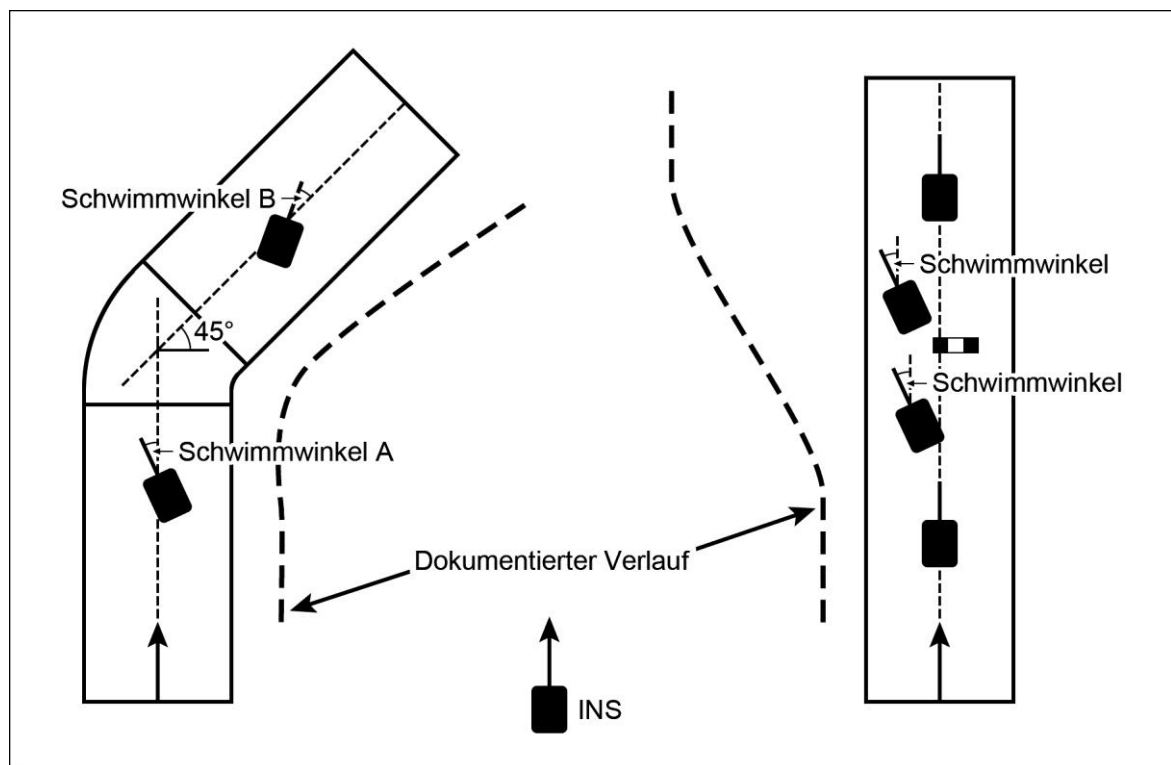


Abb. 17: Schwimmwinkel bei der Befahrung eines Bogens (links) sowie eines geraden Rohres mit Hindernis (rechts) [nach STRIEGL, 2016].

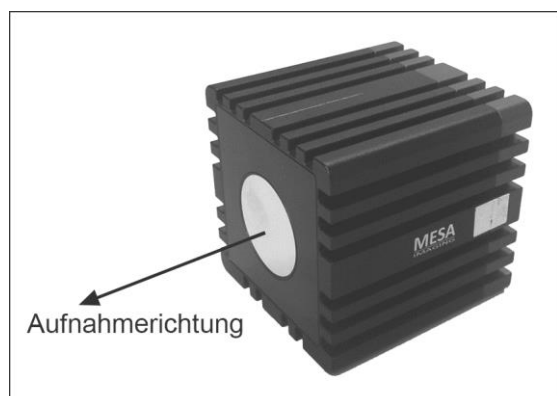


Abb. 18: SR4000 der Firma Mesa Imaging [STRIEGL, 2016].

Hough-Transformation [HOUGH, 1962] bestimmt werden. In STRIEGL [2016] wurde des Weiteren ein speziell für den Anwendungsfall entwickeltes Verfahren, das 2D-Zylinder-Fitting, zur Bestimmung der Rohrachse entwickelt.

### 2. Verschneidung der bestimmten Rohrachse mit dem Koordinatensystem der ToF-Kamera

Durch die Verschneidung kann die Lage des Koordinatensystems der ToF-Kamera bezüglich der Rohrachse bestimmt werden. Dies wird auch als äußere Orientierung der ToF-Kamera zur Rohrachse bezeichnet. Die Verschneidung liefert die Lage- und Höhenabweichung des Koordinatenursprungs zur Rohrachse sowie einen Lage- und Höhenwinkel, welche die Abweichung der z-Achse (Aufnahmerichtung) des Koordinatensystems bzgl. der Rohrachse beschreiben.

### 3. Transformation der äußeren Orientierung ins lokale Koordinatensystem

Die äußere Orientierung beschreibt die Abweichung zur Rohrachse der ToF-Kamera im Kamera-Koordinatensystem. Im letzten Schritt muss mittels der INS-Messungen die äußere Orientierung in das lokale Koordinatensystem transformiert werden, um die Schwimmwinkelkomponenten für die Lage- und Höhenberechnung des Rohrsystems zu erhalten. Die Schwimmwinkelkomponenten fließen dann als Korrekturwerte in den dann folgenden Auswerteprozess mit ein.

Die Ergebnisse der Laborversuche haben gezeigt, dass die Genauigkeit, mit der die äußere Orientierung, respektive der Schwimmwinkel, bestimmt werden kann, von verschiedenen Faktoren abhängig ist. Unter anderem führen vor allem Mehrwegeeffekte der Entfernungsmessung der ToF zu syste-

matischen Fehlern bei der Bestimmung von Schwimmwinkeln.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass das 2D-Zylinder-Fitting mit einer Genauigkeit von  $1,25^\circ$  die besten Ergebnisse bei der Bestimmung von Schwimmwinkeln liefert. Somit ist der Einsatz einer ToF-Kamera ein sinnvoller Ansatz, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit aber auch die Reichweite bei der Dokumentation von Rohrsystemen mit ASYS oder geoASYS zu erhöhen.

## 4.3 Weitere ausgewählte Anwendungsmöglichkeiten

### Direkte Bestimmung von Bogenwinkeln mittels einer Aufnahme einer ToF-Kamera

Bei Aufnahmen im Nahbereich vor Bögen besteht die Möglichkeit, die Winkel von flachen Bögen direkt aus einer Aufnahme der ToF-Kamera abzuleiten. Dazu muss mittels der im vorherigen Abschnitt schon erwähnten Verfahren RANSAC bzw. Hough-Transformation eine Segmentierung der Punktwolke erfolgen. Das Ziel ist die Bestimmung der Rohrachsen, die vor und nach dem Bogen befindlichen geraden Rohrelemente. Die beiden Rohrachsen können anschließend miteinander verschnitten werden. Der berechnete Schnittwinkel entspricht dann dem Winkel des zu bestimmenden Bogens (Abb. 19).

Bei der Bestimmung der Winkel von Bögen aus den Messungen einer ToF-Kamera ist es von

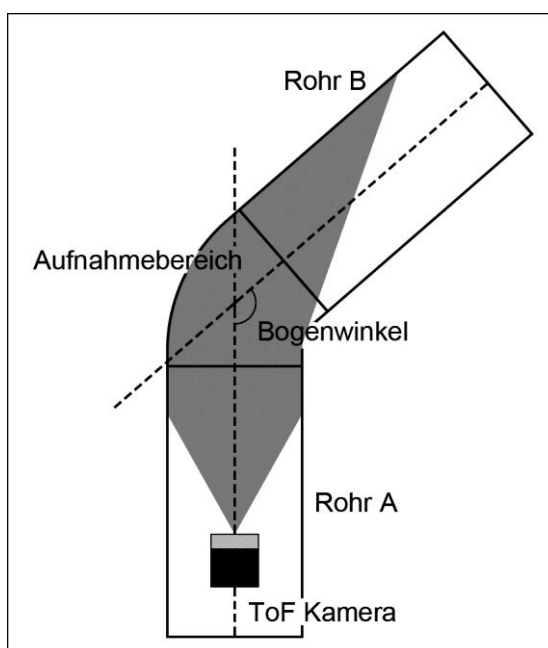


Abb. 19: Winkelbestimmung eines Bogens durch Verschneidung der Rohrachsen zweier Segmente [nach STRIEGL, 2016].

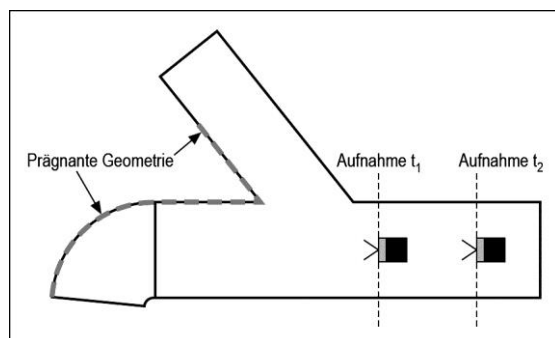
Vorteil, dass die Ergebnisse unabhängig von Messungen des INS sind. Die Ergebnisse der Schnittwinkelberechnung können in zukünftigen Filteralgorithmen verwendet werden, um die INS-Messungen bezüglich Plausibilität zu prüfen, zu verbessern oder eventuell sogar ganz zu ersetzen. Nachteilig ist jedoch, dass der Messbereich der ToF nur bei flachen Bögen die beiden Rohrabchnitte ausreichend erfassen kann.

In STRIEGL [2016] wurden erste Untersuchungen bezüglich der Genauigkeit der Bestimmung der Winkel von Bögen durchgeführt. Die Auswertung von Bögen mit großen Winkeln mittels RANSAC und der Hough-Transformation hat dabei ergeben, dass ihre Bestimmung in einer Genauigkeit von 2-3° möglich ist. Dieser Ansatz stellt somit eine weitere Möglichkeit zur Stabilisierung und Erhöhung der Genauigkeit bei der Dokumentation von Rohrsystemen dar.

#### **Bestimmung der Wegstrecke zwischen zwei Aufnahmen einer ToF-Kamera**

Grundlage für die Bestimmung von Wegstrecken mittels optischer Systeme ist die Aufnahme von identischen, prägnanten Geometrien in zwei Aufnahmen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$ . Das Ziel ist die Bestimmung der zurückgelegten Wegstrecke zwischen diesen beiden Zeitpunkten anhand prägnanter Geometrien durch ein Punktwolken-Matching. Verfahren wie zum Beispiel der Iterative Closest Point Algorithmus (ICP) [BESL et al., 1992] können hierzu Ansätze liefern. Als prägnante Geometrie kann ein am Ende eines geraden Rohrelementes befindlicher Bogen oder eine Abzweigung gewertet werden (Abb. 20).

Mittels der bestimmten äußeren Orientierung der Inspektionseinheit zur Rohrachse und dem Bezug zum lokalen Horizont, definiert durch das INS, werden die beiden Punktwolken so transformiert, dass die mittleren Rohrachsen der beiden Aufnah-



**Abb. 20:** Bogen oder Abzweigung als mögliche prägnante Geometrie (grau gerissen) in zwei Aufnahmen [nach STRIEGL, 2016].

men identisch sind. Anschließend kann dann die Verschiebung bezüglich der prägnanten Geometrie mittels des ICP bestimmt werden. Die Verschiebung entspricht der zurückgelegten Wegstrecke der Inspektionseinheit zwischen den beiden Aufnahmen.

Durch Einsatz eines optischen Systems zur Bestimmung von zurückgelegten Wegstrecken im Rohr könnten in Zukunft Fehlmessungen aufgrund von Schlupfeffekten bei den verwendeten Odometern verhindert werden. Erste Versuche mit diesem Konzept erfolgten bei HARTUNG [2014] und haben die grundsätzliche Möglichkeit der Bestimmung von Wegstrecken mittels Aufnahmen einer ToF-Kamera bestätigt. In Zukunft müssen jedoch noch weitere Untersuchungen bezüglich der erreichbaren Genauigkeit bei der Wegstreckenbestimmung erfolgen.

## **5. Zusammenfassende Bewertung und Ausblick**

Mit diesem Beitrag wird eine zusammenfassende Darstellung der Entwicklungsarbeiten des Geodätischen Labors und der Arbeitsgemeinschaft GIS der UniBwM zur Aufnahme und Dokumentation des dreidimensionalen Verlaufes von unterirdischen Abwasseranschlussleitungen vorgestellt. Bedingt durch die Unzugänglichkeit der Leitungsverläufe mit kleinen Rohrdurchmessern, geprägt durch Geradenstücke, Bögen und Abzweige, stellte die korrekte Rekonstruktion des Leitungsverlaufes eine Herausforderung dar. Die entwickelten Messsysteme haben sich nach umfangreichen Tests jedoch in der Praxis bereits seit Jahren bewährt und werden entsprechend von den Anwendern angenommen und eingesetzt.

Die Verlaufsvermessungssysteme ASYS und geoASYS sind in der Lage, während der TV-Inspektion von Grundstücksentwässerungsleitungen in Echtzeit die Geometrie und Topologie der Leitungsnetze in der erforderlichen Genauigkeit dreidimensional aufzunehmen und zu visualisieren. Darüber hinaus ist das System in der Lage, dieses erfasste Netz über definierte Schnittstellen an jedwede CAD's oder auch an Geoinformationssysteme zu übergeben. Die genau vermessene und damit darzustellende Lage und Höhe der Grundstücksentwässerungsleitungen, einschließlich der an die Leitungen angebotenen Untersuchungsdaten, gibt Planern/Sanierungsplanern die Möglichkeit, weitergehende Sanierungsansätze auf Grund der ganzheitlichen Betrachtungsweise (öffentlicher Kanal und Grundstücksentwässerungsleitung auf einer Plattform) zu berücksichtigen.

Für das Vermessungssystem hakaSYS gilt zusammenfassend, dass es sich besonders für die dreidimensionale Vermessung von gekrümmten Haltungen sehr gut eignet, wobei die Genauigkeitsforderung kleiner als eine Haltungsbreite (wenige dm) bis zu einer Haltungslänge von 100 m eingehalten werden kann. Die sehr gute Reproduzierbarkeit sowie die Verwendung von Beobachtungen aus Hin- und Rückfahrt führen dabei zu zuverlässigen Ergebnissen, wodurch auf zeit- und kostenintensive Mehrfachbefahrungen verzichtet werden kann. Auch geradlinige und gering gekrümmte Haltungsverläufe lassen sich so erfassen, dass Übergänge zwischen Krümmungen und Geraden signifikant identifizierbar sind.

Wie bei Neuentwicklungen üblich, stehen natürlich Wünsche und Weiterentwicklungen an, die im Wesentlichen die weitere Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit vor allem bei längeren Leitungen betreffen. Hierzu konnten mit zusätzlicher Sensorik wie einer ToF-Kamera erfolgreiche Ansätze entwickelt werden.

## 6. Dank

Für die finanzielle Untertützung bei den Entwicklungsarbeiten für die dargestellten Ortungssysteme sei auch an dieser Stelle der Fa. JT-Elektronik in Lindau sowie dem Stadtentwässerungsbetrieb der Stadt Kassel (Kasseler Entwässerungsbetrieb, KEB) nochmals besonders gedankt.

## Literatur / Quellen

- BAUER, Arno / HEISTER, Hansbert / REINHARDT, Wolfgang [2009]: geoASYS – ein System zur Dokumentation des Verlaufes von Grundstücksentwässerungsanlagen. Aufnahme und Dokumentation als Basis einer ganzheitlichen Betrachtung. – In: gwf Wasser | Abwasser, Heft 2-3/2009, S. 190-196. ISSN: 0016-3651
- BESL, Paul J. / MCKAY, Neil D. [1992]: A method for registration of 3-D shapes. – In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, Issue 2, S. 239-256. ISSN: 0162-8828 (Druck) ISSN: 2160-9292 (CD-ROM)
- BOLLES, ROBERT C. / FISCHLER, MARTIN A. [1981]: A RANSAC-based approach to model fitting and its application to finding cylinders in range data. – In: DRINAN, Ann (Hrsg.): IJCAI'81, Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver, BC, Canada, August 24-28, 1981, Vol. 2. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, S. 637-643. ISBN: 0-86576-059-4

- GÜNTHERT, F. Wolfgang [1999]: Ursachen von Schäden in Abwasserkanälen. – In: Wasser und Abfall, Heft 5/1999, S. 8-13. ISSN: 1436-9095 (Druck) ISSN: 2192-8754 (E-Version)
- HARTUNG, Maximilian [2014]: Genauigkeitsuntersuchung der Wegstreckenbestimmung in einem Rohrsystem aus Aufnahmen einer 3D-Kamera. Masterarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, unveröffentlicht.
- HEISTER, Hansbert / HÜMMER, Frank / REINHARDT, Wolfgang [2004]: Machbarkeitsstudie zum Aufbau eines Ortungssystems für Leitungsinspektion. Bericht. Fa. JT-Elektronik, Lindau.
- HEISTER, Hansbert / REINHARDT, Wolfgang [2007]: 3D-Dokumentation von Kanalanschlussleitungen. – In: CHESI, Günther / WEINOLD, Thomas (Hrsg.): 14. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2007. Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 31-39. ISBN: 978-3-87907-446-4
- HEISTER, Hansbert / REINHARDT, Wolfgang / GÜNTHERT, F. Wolfgang / CVACI, Darius [2007]: 3D-Dokumentation von Kanalanschlusskanälen und Grundstücksentwässerungsleitungen. – In: KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall, Heft 6/2007, S. 584-588. ISSN: 1866-0029
- HOL, Jeroen D. / SCHÖN, Thomas B. / GUSTAFSSON, Fredrik / SLYCKE, Per J. [2006]: Sensor Fusion for Augmented Reality. – In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE) (Hrsg.): 2006 9th International Conference on Information Fusion. Proceedings of a meeting held 10-13 July 2006, Florence, Italy. IEEE Service Center, Piscataway, 6 S. ISBN: 1-4244-0953-5
- HOUGH, Paul V. C. [1962]: Method and means for recognizing complex patterns. United States Patent US3069654 A.
- HÜMMER, Frank / KANDAWASVIKA, Admire / HEISTER, Hansbert [2013]: Ein neues Messsystem zur Verlaufsbestimmung von gekrümmten Haltungen. – In: 3R Technical journal for piping system integrity and efficiency, Heft 3/2013, S. 42-46.
- MOORE, Steven T. / MACDOUGALL, Hamish G. / GRACIES, Jean-Michel / COHEN, Helen S. / ONDO, William G. [2006]: Long-term monitoring of gait in Parkinson's disease. – In: Gait & Posture, Vol. 26, Issue 2, S. 200-207. ISSN: 0966-6362
- STRIEGL, Philipp [2016]: Genauigkeitsuntersuchungen zum Einsatz einer Time of Flight Kamera für die Vermessung von Grundstücksentwässerungsanlagen. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, Universität der Bundeswehr München, 259 S. <http://athene-forschung.unibw.de/doc/114960/114960.pdf> – letzter Aufruf: 22.01.2018
- STRIEGL, Philipp / HEISTER, Hansbert / KANDAWASVIKA, Admire / REINHARDT, Wolfgang / RENTER, Jörg [2010]: Multisensorsystem geoASYS zur 3D-Kanaldokumentation. – In: WUNDERLICH, Thomas A. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 10. Beiträge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, München, 2010. Wichmann Verlag, Berlin, S. 145-156. ISBN: 978-3-87907-492-1
- STRIEGL, Philipp / REINHARDT, Wolfgang / HEISTER, Hansbert / KANDAWASVIKA, Admire / HÜMMER, Frank [2012]: Multi-sensor based Surveying of House Drainage System – The



current state of the art. – In: 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2012), 13-15 November 2012, Sydney, Australia. IEEE, Piscataway, 4 S.  
ISBN: 978-1-4673-1954-6

**Anschriften der Verfasser:**

Prof. Dr.-Ing. habil. HANSBERT HEISTER  
Universität der Bundeswehr München  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
D-85577 Neubiberg  
E-Mail: h.heister@unibw.de

Dipl.-Ing. FRANK HÜMMER  
Rehhofstraße 54  
D-90482 Nürnberg  
E-Mail: frank.huemmer@online.de

Dr.-Ing. ADMIRE KANDAWASVIKA  
AED-SICAD AG  
Carl-Wery-Straße 22  
D-81739 München  
E-Mail: admire.kandawasvika@aed-sicad.de

Dr.-Ing. PHILIPP STRIEGL  
Stadtwerke München  
Emmy-Noether-Straße 2  
D-80992 München