

Die Erfassung unterirdischer Schachtanlagen mittels Laserscanning

The Determination of Subterranean Excavations with Laser Scanning

Marcel Fuß, Rudolf Staiger

Zur geometrisch gesamthaften Erfassung kleiner unterirdischer Schachtanlagen wurde ein Messsystem, das aus möglichst serienmäßigen Komponenten bestehen soll, bis zur Serienreife entwickelt. Hauptbestandteil ist ein Panoramascanner im „Überkopfbetrieb“ in Kombination mit einem spez. Pendelstativ. Die Versuche wurden mit einem Z+F IMAGER® 5006i von Zoller + Fröhlich durchgeführt. Das Messkonzept ist jedoch grundsätzlich auf alle Scanner dieses Typs übertragbar, sofern ein Überkopfbetrieb möglich ist. Nach der Beschreibung der grundsätzlichen Ausgangssituation werden das Messkonzept sowie die Ergebnisse erster Testmessungen vorgestellt.

SCHLÜSSELWÖRTER: Laserscanner, Erfassung unterirdischer Hohlräume, Kanalscanner, Scanner im Überkopfbetrieb, Pendelstativ, Kanalmesstab, IMAGER 5006

The determination of the topography of subterranean excavations (like gullies, sinks, etc.) is until now costly and time-consuming. Very often huge Hidden-Point-Poles are used in conjunction with tacheometers. A new measurement concept is developed with as much standard products as possible: The main component is a Laser Scanner (here IMAGER 5006i from Z+F) used in an upside-down-mode in combination with a special pendulum-tripod. The first investigations are very promising. The concept can be transformed to all laser scanners which can be used in the upside-down-orientation. The big advantage of this method compared to the existing ones: the data collection on site is faster and there is much more information. The time-consuming data processing is realized later on in the office.

KEYWORDS: Laser scanner, topography of subterranean excavations, IMAGER 5006, scanner in upside-down-mode, hidden point poles, special pendulum tripod

1 EINLEITUNG

In Deutschland gibt es Millionen von kleinräumigen, meist im städtischen Straßenverkehrsraum befindliche Schachtanlagen, für die ein permanenter Bedarf an geometrischer Information bzw. Aufmaß zur Bestandsdokumentation oder als Planungsgrundlage weiterer Baumaßnahmen besteht. Bisher wird dieser Aufgabe gelöst, indem

der Schacht entweder von innen oder von oben mit Hilfe sog. Kanalmesstaben tachymetrisch aufgemessen wird. Das Endergebnis sind – unter einem hohen personellen Aufwand – wenige repräsentative Punkte mit mäßiger Genauigkeit (1–3 cm).

Im Folgenden wird versucht, das bisherige Verfahren durch eine flächenhafte Methode mit einer sehr viel höheren Informationsdichte effizient zu ersetzen.

1.1 Aufgabenstellung

Messaufgabe: Schachtanlagen typisch für Straßen- und Kanalbau (Dimensionen: horiz. Ausdehnung $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, max. Tiefe 5 bis 10 m) sollen durch eine schachtförmige Öffnung (Kanaldeckel) mit einem Laserscanner erfasst werden. Die Rahmenbedingungen sind:

1. Die Messung soll von oben erfolgen, ohne dass der Schacht betreten werden muss.
2. Eine minimale Aufnahmezeit vor Ort wird angestrebt. Der Zeitaufwand pro Schacht soll nicht mehr als 30 Minuten betragen.
3. Die Messausrüstung soll robust, transportabel und preiswert sein.
4. Die Messausrüstung soll von einer Person bedient werden können.

Ist ein derartiges System realisierbar, hat dieses viele Vorteile:

1. Die Gefahr von Personenschäden, durch Sturz, giftige Gase, usw. wird stark reduziert.
2. Der Personalaufwand wird wg. nicht erforderlicher Sicherungspersonal (oben auf der Straße) gegenüber einer Lösung mit „Hineinsteigen“ geringer.
3. Durch ein flächenhaftes Verfahren stehen mehr und detailreichere Informationen in kürzerer Zeit zur Verfügung.
4. Die Auswertung kann auch ohne Informationsverluste später bzw. stufenweise nachgeholt werden. Eine detaillierte Auswertung bedeutet keine verlängerte Aufnahmezeit vor Ort.
5. Der eigentliche Auswerteprozess findet in angenehmerer und sicherer Arbeitsatmosphäre als bisher statt.

2 MESSKONZEPT

Das unterirdische Schachtbauwerk soll künftig mit einem Laserscanner erfasst werden. Um die resultierenden Punktwolken in ein oberirdisch bekanntes Koordinatensystem transformieren zu können, muss die Lage und Orientierung des Scanners zum Messungszeitpunkt bekannt sein. Eine genaue Georeferenzierung stellt bei näherer Betrachtung eine, wenn nicht sogar die kritische Komponente beim Scannen unterirdischer Bauwerke dar, weshalb zunächst diese Problematik gesondert betrachtet wird.

2.1 Georeferenzierung des Scanners im Schacht

Mit dem ZLS07 wurde an der ETH Zürich eigens ein Scanner speziell für diese Aufgabe entwickelt (ZOGG 2008). Die Hauptkomponenten des ZLS07 sind ein Zeilenscanner LMS200 der Fa. SICK sowie ein am IPG entwickeltes Drehmodul, welches die Erzeugung von 3D-Punktwolken ermöglicht. Bei diesem Schachtkammersystem (genannt KMS) werden zwei Strategien zur Georeferenzierung des Scanners bzw. der Punktwolke verfolgt:

1. Der Scanner hängt an einem starren Pendelstativ, welches an der oberirdischen Seite mit einem horizontalen Balken abschließt, der mit 2 Reflektoren bestückt ist (vergleichbar mit einer Basislatte). Die räumliche Lage der Reflektoren ist bezogen auf

die Lage und Orientierung des Scanners bekannt, sodass eine tachymetrische Einmessung der beiden Reflektoren zur Georeferenzierung genügt.

2. Liegen aus dem Kanalkataster geometrische Vorinformationen vor, z.B. die Richtungen der Ab- und Zuflussrinne, kann auf eine tachymetrische Einmessung ganz verzichtet werden.

Hier wird eine weitere Variante vorgeschlagen und erprobt.

3. Ähnlich zu dem KMS wird ein Scanner an einem Stativ, frei hängend, eingesetzt. Zur Georeferenzierung wird zunächst ein oberirdischer Scan aufgenommen. Koordinatenmäßig bekannte Zielpunkte (Targets) im oberirdischen Objektraum dienen der Lagebestimmung der Scannerposition (Abb. 1a). Zusätzlich

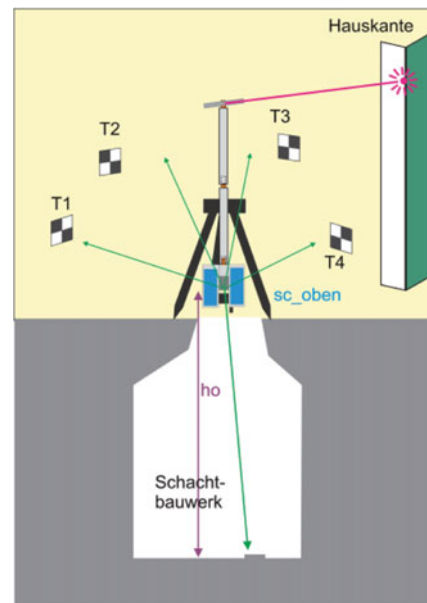


Abb. 1a | Oberirdische Scanposition

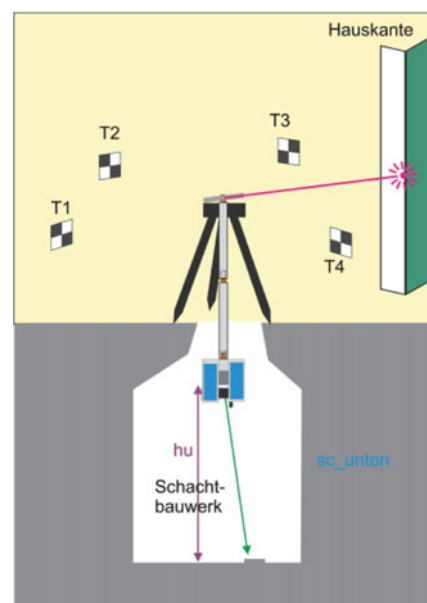


Abb. 1b | Unterirdische Scanposition



Abb. 2a | Richtungslaser auf obersten Rohrelement



Abb. 2b | Richtungslaser mit Klemmschraube für vertikale Neigung

wird mit einem einfachen Baulaser die horizontale Orientierung durch Visieren auf eine vertikale Hauskante festgelegt. Nach dem Absenken des Scanners in die Schachtkammer wird dieselbe horizontale Orientierung durch erneutes Ausrichten auf die Hauskante wieder hergestellt (Abb. 1b). Die Lagekoordinaten werden von der oberirdischen Position übernommen. Der Höhenunterschied zwischen den beiden Scanpositionen kann direkt den beiden Punktwolken entnommen werden.

2.2 Messausrüstung

Die Messausrüstung besteht aus einer einfachen Richtungslaserkonstruktion (Eigenanfertigung, Abb. 2), einem Z+F IMAGER® 5006i und einem Pendelstativ (Abb. 3), welches derzeit noch eine Sonderanfertigung der Firma Gottlieb Nestle ist.

SURVEYORS - EXPRESS™
 WWW.VERMESSEN.DE WWW.GPSGEO.COM

Lupinenweg 108, 61118 Bad Vilbel, Vermessungsinstrumente & Zubehör
 Landsurveying-Instruments & Equipment, Tel: ++496101 5413-54 Fax: -55




TOTAL STATIONS - THEODOLITE - LASERDISTANCEMETER - CONSTRUCTION-LASERS - LEVELS - SURVEYING EQUIPMENTS
...new and secondhand Total Stations on Stock.



- when it has to be right



Brandmarks: Sprinter™ - Baumeister™ - Swiss-Style-Level™ - Swiss-Style-Theo™

2.3 Grundsätzlicher Ablauf einer Messung

Da in den meisten Fällen ein georeferenziertes Aufmaß der Punktwolke gefordert wird, ist ein oberirdischer Scan notwendig. Im ersten Schritt werden sämtliche Rohrelemente montiert, die für den unterirdischen Scan erforderlich sind. Anschließend wird der Richtungslaser auf eine markante Ecke (z. B. Hauskante) ausgerichtet. Durch das tachymetrische Aufmaß der vorab aufgestellten Targets kann der oberirdische Scan georeferenziert werden.



Abb. 3a | Scanner im „Überkopf-Betrieb“

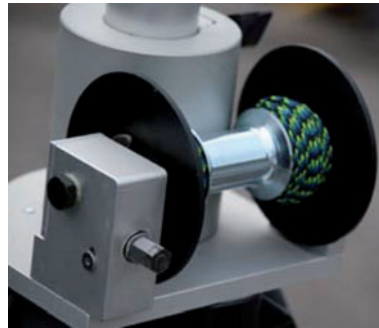


Abb. 3b | Kurbelkomponente des Pendelstativs

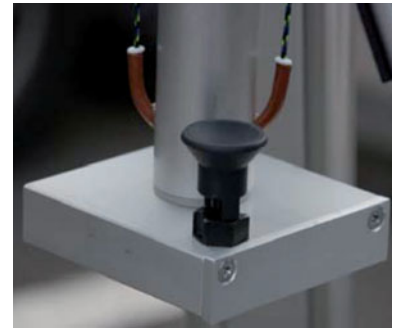


Abb. 3c | Adapterplatte des Scanners

Nach dem oberirdischen Scan im „Überkopf-Betrieb“ fährt man den Scanner auf seine unterirdische Position (Abb. 4), richtet den Laserpointer wieder auf die Kante aus und kann nach einer gewissen Einschwingphase/-zeit den Scan starten. Das Herablassen des Scanners erfolgt über eine Kurbel, die auch mit einem Akkuschrauber betätigt werden kann.

Somit sind die unterirdische Lageposition und die Orientierung identisch mit der oberirdischen; als einzige unbekannte Größe verbleibt der Höhenunterschied zwischen beiden Scanpositionen. Dieser wird später in der Auswertesoftware (hier: Z+F LaserControl) bestimmt. Als Ergebnis erhält man ein georeferenziertes Aufmaß des Schachtbauwerkes.

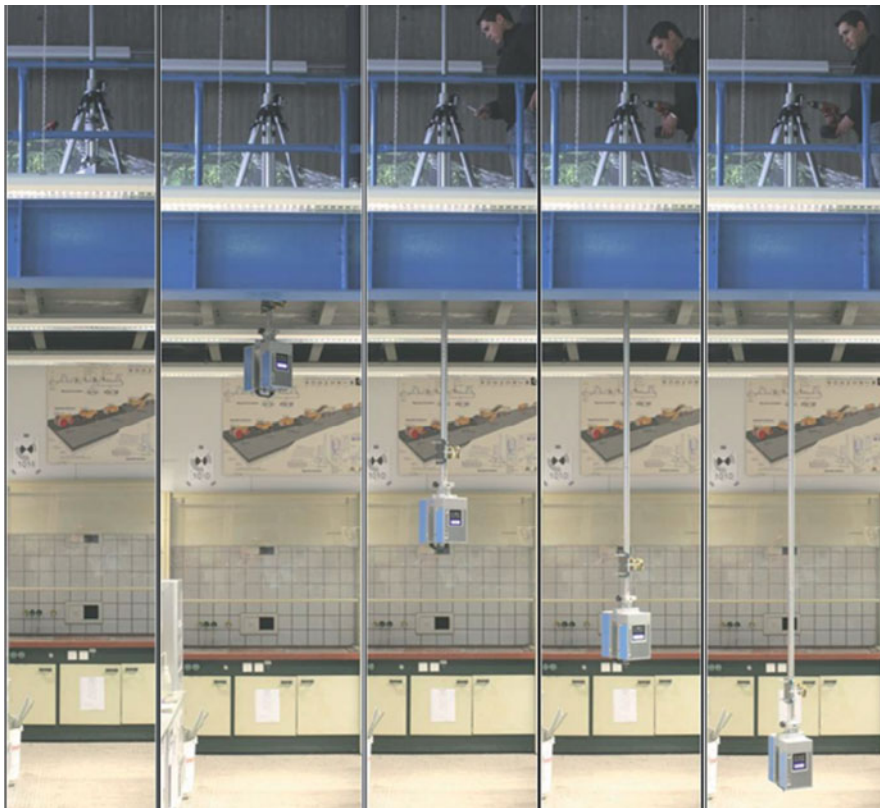


Abb. 4 | Scanner im „Überkopf-Betrieb“ – Schachanlage wird durch Bodenöffnung simuliert



Abb. 5 | Messung der Eigenrotation durch Autokollimation

3 VORUNTERSUCHUNGEN

Um die o.g. Methode auf Tauglichkeit und Leistungsfähigkeit zu untersuchen, wurden mehrere Tests an der Hochschule Bochum durchgeführt, bei denen die Schachtbedingungen simuliert wurden.

3.1 Machbarkeitsuntersuchung im Freien

Auf dem Balkon vor dem Labor für 3D-Laserscanning der HS Bochum wurde eine Gitterrostplatte durch eine Sipo-Platte ersetzt, in die eine Öffnung von 35 cm × 20 cm gesägt wurde, welche den Schacht-

zustieg simuliert. So konnte man den Scanner in ca. 4 m Tiefe herablassen. Der Vorteil gegenüber einem tatsächlichen Schacht besteht hauptsächlich in der Möglichkeit, die verschiedenen Scans mit denselben Targets unterschiedlich verknüpfen zu können und somit präzise Aussagen über die Qualität des geometrischen Modells machen zu können.

Insgesamt wurden in drei unterschiedlichen Tiefen Scans durchgeführt. Parallel wurden die Eigenbewegungen des Scanners mit einem Lasertracker (T3 von API) beobachtet. An unterster Scanposition wurde zudem die Eigenrotation des am Pendelstativ hängenden Scanners durch Autokollimation (ELCOMAT 2000 von MÖLLER-WEDEL) bestimmt.

In Abb. 6 ist die Bewegung des Scanners am Pendelstativ in allen Koordinatenrichtungen dargestellt. Ein Bewegungsmuster, abhängig von Scan- bzw. Ruhezustand, ist nicht zu erkennen. Die Ortsänderungen betragen in der Lage ca. 10 mm, in der Höhe sind keine signifikanten Änderungen festzustellen.

Die Verdrehungen des Scanners am Pendelstativ sind in Abb. 7 dargestellt. Mit dem Autokollimator wurden signifikante Verdrehungen und Verkippen detektiert.

Die Wellenlinien der Zielmarkenkanten (Abb. 8b) in der visuellen Darstellung der Punktwolken (hier Projektion der Punktwolke auf einen vertikalen Kreiszylinder) sind ein untrügliches Zeichen für Eigenbewegungen (insbes. Verdrehungen) des Scanners während der Datenerfassung.

Erstes Fazit: der IMAGER® 5006i kann grundsätzlich über Kopf, am Pendelstativ hängend, genutzt werden. Allerdings traten bei ersten Funktionstests starke Eigenbewegungen (Rotationen und Translationen) auf, die in dieser Größenordnung nicht zu erwarten waren. Wind kommt als Ursache dieser Störungen in Frage, weshalb die weiteren Untersuchungen in einen windstillen Innenraum, das Baustofflabor der HS Bochum, verlegt wurden.

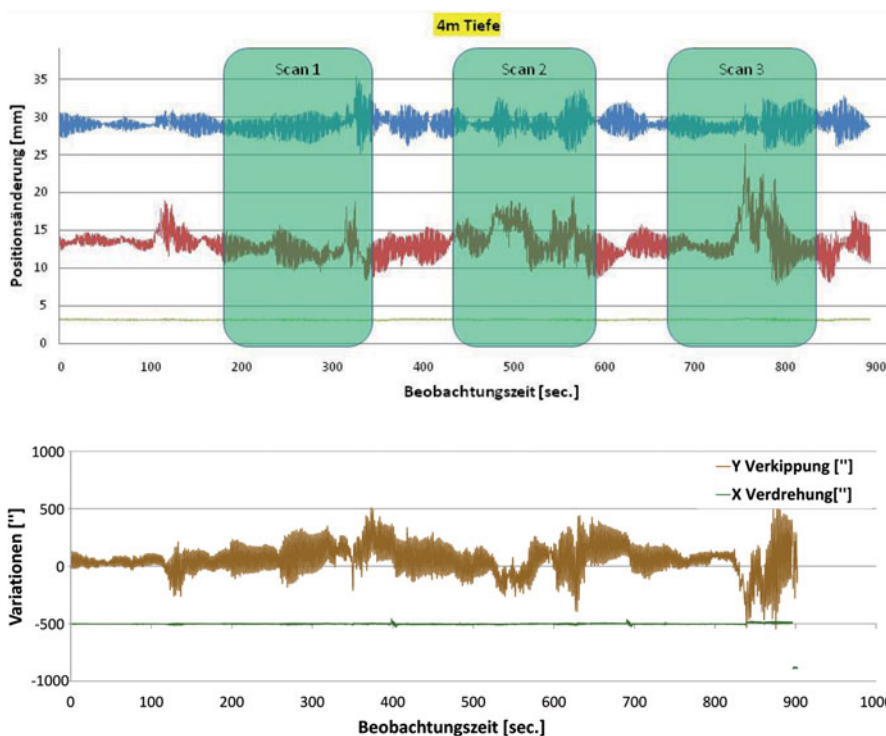


Abb. 6 | Eigenbewegungen des Scanners in 4 m Tiefe

Abb. 7 | Verdrehungen des Scanners während einem Scan (gemessen mit ELCOMAT 2000)

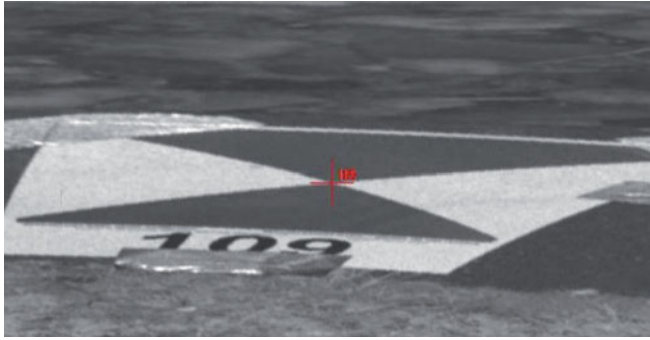


Abb. 8a | Von oberer Scanposition

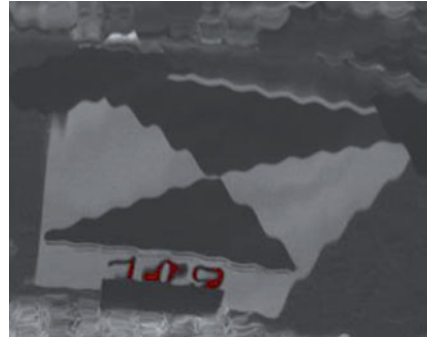


Abb. 8b | Von unterster Scanposition

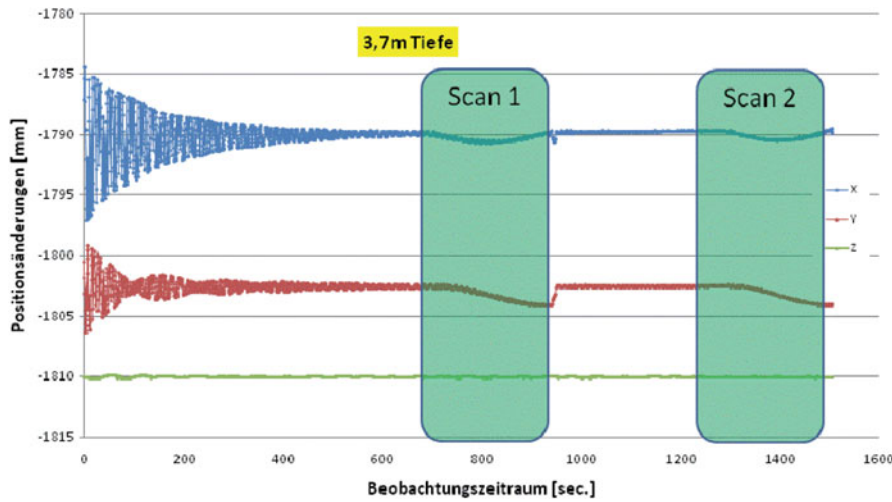


Abb. 9 | Eigenbewegung des Scanners in 3,7 m Tiefe

3.2 Machbarkeitsuntersuchung im Labor

Die zweite Machbarkeitsstudie wurde im Baustofflabor der BO durchgeführt, da hier ein Schutz vor äußeren Einflüssen wie Wind, gegeben ist. Der Schachtzustieg wird wieder über eine Bodenöffnung auf einer Empore simuliert (Abb. 4). Maximal lassen sich Tiefen von 4 m simulieren. Bei dieser Studie kamen neben dem Lasertracker noch ca. 25 tachymetrisch bestimmte Z+F AutoTargets zum Einsatz.

Die Eigenbewegungen des Scanners am Pendelstativ zeigen sich – gegenüber den ersten Messungen im Freien – wesentlich reduziert. In der oberirdischen Scanposition sind praktisch keine Bewegungen zu erkennen (< 1 mm). Die Bewegungen an den unterirdischen Positionen weisen nach einer Einschwingphase von mehreren Minuten nur noch Amplituden von 1 bis 2 mm auf (Abb. 9). Die Bewegungen während des Scans könnten von einer evtl. leicht asymmetrischen Gewichtsverteilung im Scanner stammen.

Abb. 10 zeigt die Lageänderungen des Scanners während einer Aufnahme. Einer Schraubenlinie gleich verändert der Scanner seine Lage um max. 2 mm in der Horizontalebene.

Damit sind die Eigenbewegungen des Scanners signifikant geringer als bei den Versuchen im Freien. „Wind“ scheint tatsächlich die Ursache für die großen Translationen und Rotationen im Rahmen der ersten Versuche gewesen zu sein.

Für die Genauigkeitsbetrachtungen des erfassten Objektraums wurde eine Registrierung der einzelnen Scans untereinander durch-

geführt. Diese erfolgte mit einer Standardabweichung von 0,3 mm (1 σ , 1 Koordinatenrichtung). Bei der Georeferenzierung gegenüber der Tachymetrie wurde eine Standardabweichung von 0,6 mm erzielt.

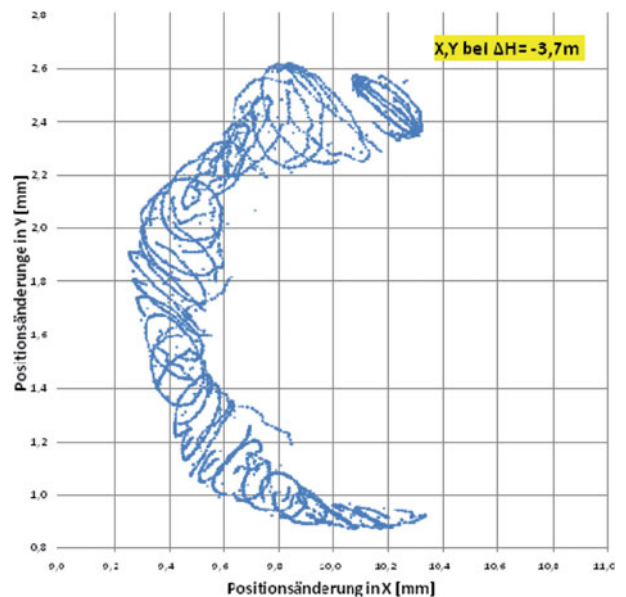


Abb. 10 | Lageänderung während eines Scans in mm

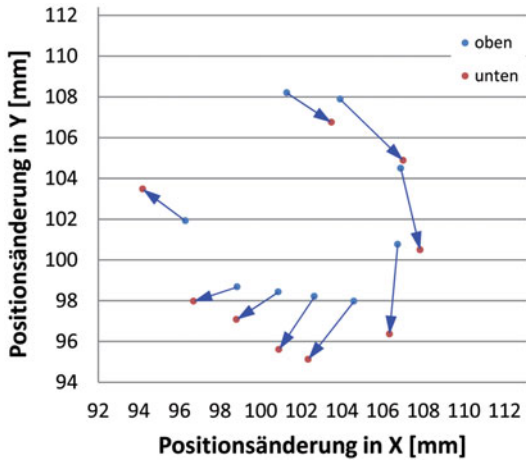


Abb. 11 | Vektorgraphik der Verdrehung

Um die Genauigkeiten der Richtungsübertragung zu untersuchen, wurde eine Registrierung durchgeführt, wie sie später in der Praxis auch angewandt werden soll.

Das heißt, die Lagekoordinaten und die Drehwinkel um die X- und Y-Achse werden aus dem oberirdischen Scan übernommen. Der unterirdische Scan wird – mit Hilfe des Laserpointers – auf dieselbe Hauskante ausgerichtet (= Übernahme der Rotation um Z); der Höhenunterschied zwischen den Scans wird aus der Punktwolke entnommen. Die Koordinaten aus dem auf diese Weise transformierten Scan wurden anschließend mit den tachymetrisch bestimmten Koordinaten der Targets verglichen (Abb. 11).

Bei Distanzen bis zu 8,1 m wurden Lageabweichungen von bis zu 11 mm und Höhenabweichungen von bis zu 16mm in den Targets festgestellt. Die Restabweichungen (Tab. 1 bzw. Abb. 11) deuten auf eine horizontale Verdrehung zwischen der ober- und unterirdischen Punktwolke hin. Dies lässt darauf schließen, dass die Orientierungsmethode (Laserpointer) noch verfeinert werden kann.

Die Höhenübertragung zwischen den Scans erfolgt erst im Innendienst bei der Auswertung der Daten. In der Software Z+F LaserControl greift man im oberirdischen Scan einen Punkt im Nadir ab und

PNr.	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	Distanz [m]
1008	-3,5	-5,2	9,4	7,39
1009	1,9	-8,0	11,5	5,44
1010	4,4	-2,9	1,0	2,69
1012	-4,2	3,1	-2,9	6,38
1013	6,2	-6,0	6,1	3,34
1014	-4,1	-2,7	5,5	7,13
1015	-4,3	-1,4	1,2	7,36
1016	-4,5	-5,7	12,9	8,13
min	-5	-8	-3	
max	6	3	13	

Tab. 1 | Koordinatendifferenzen zwischen oben und unten

notiert die dazugehörige Entfernung. Im jeweiligen unterirdischen Scan geht man auf dieselbe Weise vor und erhält durch Subtraktion den gesuchten Höhenunterschied.

Verglichen mit den bekannten Höhenunterschieden aus den georeferenzierten Scannerkoordinaten, resultiert eine Differenz von ca. 1 mm in der Höhe.

4 FAZIT & AUSBLICK

Das Fazit der bisher durchgeführten Untersuchungen fällt wie folgt aus:

- Mit geringem instrumentellem Aufwand ist es gelungen, ein Funktionsmuster für ein detailreiches, genaues und schnelles Aufmaß für Kanalschächte zu entwickeln.
- Die Methode bietet – gegenüber den aktuell gebräuchlichen Verfahren – eine deutliche Erhöhung der Arbeitssicherheit.
- Die Funktionstauglichkeit wurde im angestrebten Rahmen einer „cm-Genauigkeit“ nachgewiesen

Im nächsten Schritt wird die Methode an realen Bauwerken erprobt und weiter verbessert. Eine Aufnahmezeit von maximal 30 Minuten pro Schacht erscheint dabei als ein erreichbares Ziel.

Literatur

[1] Fuss, Marcel (2011): Die Aufmessung unterirdischer Schachtanlagen mit einem Laserscanner – Entwicklung und Erprobung eines Messkonzepts. Bachelorarbeit Hochschule Bochum, Studiengang Vermessung, unveröffentlicht.
 [2] Zogg, H.-M. (2008): Terrestrisches Laserscanning zur Aufnahme von technischen Bauwerken am Beispiel von Schachtkammern. 74. DVW-Seminar „Terrestrisches Laserscanning – Ein Messverfahren erobert den Raum“ 2007. Schriftenreihe des DVW, Heft 53, S. 187–200.

B. Eng. Marcel Fuß,

HOCHSCHULE BOCHUM
 FACHBEREICH VERMESSUNG UND
 GEOINFORMATIK

Im Vogelsang 35 | 45527 Hattingen
 E-Mail: marcel@familiefuss.de



Prof. Dr.-Ing. Rudolf Staiger,

HOCHSCHULE BOCHUM
 FACHBEREICH VERMESSUNG UND
 GEOINFORMATIK

Lennerhofstraße 140 | 44801 Bochum
 E-Mail: rudolf.staiger@hs-bochum.de



Manuskript | eingereicht: 11.2.2011 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet